Algimantas Ažusienis
Aloyzas Pučinskas
Vytautas Straižys

ASTRONOMIJA

Algimantas Ažusienis
Aloyzas Pučinskas
Vytautas Straižys

ASTRONOMIJA

ANTRASIS PAPILDYTAS IR
PATAISYTAS LEIDIMAS

Kultūra
VILNIUS, 2003

Rekomenduota
Aukštųjų mokyklų bendrųjų
vadovėlių leidybos komisijos

Recenzavo
prof. habil. dr. *Antanas Bartkevičius*,
doc. dr. *Jokūbas Sūdžius* ir
dr. *Kazimieras Černis*

Leidinį rėmė
Lietuvos Respublikos švietimo
ir mokslo ministerija
ir Teorinės fizikos ir astronomijos
instituto planetariumas

ISBN 9986-435-10-2

VIRŠELIŲ ILIUSTRACIJOS

I-ajame viršelyje – galaktika M 83. Anglijos ir Australijos observatorijos nuotrauka.

I-ojo viršelio priešlapiuose – Didžiojo Oriono ūko šiaurinės pusės centrinė dalis, nufotografuota infraraudonaisiais spinduliais Europos pietinės observatorijos 8,2 m teleskopu „VLT-Antu“. Infraraudonieji spinduliai leidžia pamatyti per 1000 naujagimių žvaigždžių. Centre – masyviausių ir šviesiausių naujagimių žvaigždžių grupelė Trapecija (Oriono θ_1).

II-ojo viršelio priešlapiuose – emisinis ūkas Erelis, arba M 16, ir jo plati aplinka. Kit Pyko observatorijos nuotrauka, gauta [O III] 500,6 ir 495,8 nm spindulius pavertus mėlynais, Hα 656,3 nm spindulius pavertus žaliais, [S II] 671,6 ir 673,0 nm spindulius pavertus skaisčiai raudonais.

II-ajame viršelyje – šviesūs ir tamsūs ūkai prie Oriono ζ, arba Alnitako. Matosi raudoni emisiniai ūkai Liepsna, arba NGC 2024, ir IC 434, melsvas atspindžio ūkas NGC 2023, tamsūs dujų ir dulkelių debesys Italija bei Arklio Galva (iš žurnalo „Sky and Telescope“).

Knygoje įdėta nuotraukų, gautų iš šių šaltinių: NASA tarplanetiniai ir orbitiniai erdvėlaiviai (daugiausia Hablo kosminis teleskopas), Europos pietinė observatorija (ESO, Čilėje), Kit Pyko observatorija (KPNO, JAV), Anglijos ir Australijos observatorija (AAO, Australijoje), iš žurnalų „Sky and Telescope“, „Astronomy“.

Pratarmė

PIRMAJAI LAIDAI

Šį vadovėlį autoriai stengėsi parengti taip, kad jis tiktų Lietuvos aukštųjų mokyklų fizikos specialybės studentams. Autoriai tikisi, kad vadovėlis bus reikalingas ir visiems Lietuvos fizikos mokytojams. Šiuolaikinis fizikos mokytojas privalo pats gerai pažinti tą nuostabią gamtinę fizikos laboratoriją, kuri veikia Visatoje ir iš esmės papildo, praplečia ir patobulina žmonių sukurtas fizikos laboratorijas Žemėje.

Šis vadovėlis yra palyginti nemažos apimties. Gal kam gali pasirodyti, kad jis per platus. Tačiau kol kas būtų didelė prabanga išleisti kelis skirtingos apimties astronomijos vadovėlius, kurie tenkintų įvairių skaitytojų poreikius. O nepasenusios užsienio literatūros šiuo metu Lietuvoje irgi sunku gauti. Todėl pasirinkome išsamesnio vadovėlio variantą. Kitaip kai kurie astronomijos klausimai liktų per siaurai analizuojami arba ir visiškai neliesti.

Vis dėlto vieno skyriaus – apie astronomijos istoriją, vengdami dar didesnės vadovėlio apimties, neįdėjome. Galvojame, kad astronomijos istorija, plačiau nušviečiant Lietuvos astronomijos istoriją, verta atskiros knygos.

Už vertingus patarimus, pastabas ir pataisymus autoriai nuoširdžiai dėkoja recenzentams doc. Vincui Kaminskui ir doc. Jokūbui Sūdžiui, redaktorei Ritai Klimkienei, taip pat doc. Donatui Grabauskui, dr. Gražinai Tautvaišienei ir dr. Vladui Vansevičiui. Iš gerbiamųjų skaitytojų irgi laukiame pastabų bei pageidavimų, kuriuos prašytume siųsti šiais adresais: Vilniaus pedagoginio universiteto Teorinės fizikos katedra (Studentų 39), Vilniaus universiteto Astronomijos observatorija (Čiurlionio 29), Teorinės fizikos ir astronomijos institutas (Goštauto 12).

AUTORIAI

Pratarmė

ANTRAJAI LAIDAI

Pirmoji šio vadovėlio laida pasirodė 1995 m. pradžioje, o parengtas jis buvo 1994 m. Nuo to laiko astronomijos mokslas pasipildė naujais faktais ir samprotavimais. Saulės sistemos kūnus iš arti tyrė nauji erdvėlaiviai, ėmė veikti nauji galingesni ir tobulesni radijo, optiniai, rentgeno teleskopai, gama spindulių, neutrinų detektoriai. Paskelbti orbitinės observatorijos Hipparcos stebėjimų duomenys, kuriais pasinaudoję galime apie dešimt kartų padidinti metinio paralakso būdu patikimai nustatomus žvaigždžių nuotolius. O tai savo ruožtu leidžia patikslinti mūsų žinias ir apie tolimiausių Visatos objektų nuotolius, jų amžių, spinduliavimo galią, kilmę ir evoliuciją. Ypač daug įdomių siurprizų pateikė ir vis dar tebeteikia Hablo kosminis teleskopas. Astronomai vis tobulesniais spinduliuotės imtuvais tiksliau ir masiškiau atlieka astrofotometrijos ir spektrinių tyrimų darbus. Naudojama vis gausesnė ir galingesnė kompiuterinė technika, padedanti sukurti vis detalesnius ir tikslesnius dangaus kūnų ir jų sistemų sandaros, fizikinių procesų juose, jų kilmės ir raidos modelius.

Taigi astronomijos pažanga vertė parengti antrąją pataisytą ir papildytą šio vadovėlio laidą. Ją rengiant, buvo atsižvelgta į bendradarbių, studentų, mokytojų ir kitų skaitytojų pastabas, už kurias autoriai nuoširdžiai dėkoja. *Autoriai taip pat nuoširdžiai dėkoja Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministerijai, Lietuvos valstybės mokslo ir studijų fondui, VU TFAI planetariumui, recenzentams prof. habil. dr. Antanui Bartkevičiui, doc. dr. Jokūbui Sūdžiui ir dr. Kazimierui Černiui, dailininkui prof. Alfonsui Žviliui, dr. Stasei Bartašiūtei.*

Laukiame ir antrosios laidos skaitytojų pastabų bei pageidavimų.

AUTORIAI

ĮVADAS

Algimantas Ažusienis

Astronomija yra mokslas apie Visatos materijos pasiskirstymą, jos objektų ir jų sistemų judėjimą, sudėtį, fizinę būseną, sandarą, kilmę ir raidą. Pavadinimas kilęs iš graikiškų žodžių *astron* – žvaigždė ir *nomos* – dėsnis. Astronomija tiria Saulės sistemos kūnus, planetas prie kitų žvaigždžių, žvaigždes, jų sistemas, tarpplanetinę, tarpžvaigždinę, tarpgalaktinę medžiagą, dangaus kūnų skleidžiamas elektromagnetines bangas ir neutrinus, dangaus kūnų ir jų sistemų gravitacinius ir magnetinius laukus, kosminius spindulius, jų sąveiką su magnetiniais laukais bei fotonais, reliktinius fotonus, Visatos erdvės ir laiko struktūrą, bando registruoti gravitacines bangas, ieško nežemiškųjų civilizacijų. Astronomiją galima suskirstyti į tris šakas – astrometriją, dangaus mechaniką ir astrofiziką.

Astrometrijos uždavinys yra nustatyti tiek regimąsias, tiek ir tikrąsias dangaus kūnų ir jų detalių padėtis bei jų kitimą perspektyviniame dangaus reginyje ir erdvėje, tirti Žemės sukimąsi apie ašį, tikslinti pagrindines astronomines konstantas, sudaryti pagrindinę koordinačių sistemą. Astrometrijos rezultatai naudojami ne tik kitose astronomijos šakose, bet ir tokioje būtiniausioje praktinėje žmogaus veikloje, kaip orientavimasis erdvėje ir laike. Astrometrijos rezultatais remiasi geodezija, geofizika, kartografija, dangaus mechanika, kosmonautika.

Dangaus mechanika nagrinėja gravitacijos valdomą įvairių dangaus kūnų, tarp jų ir erdvėlaivių, judėjimą, kuria metodus, kaip apskaičiuoti dangaus kūnų trajektorijas išmatavus keletą jų padėčių dangaus sferoje, ir atvirkščiai – kaip, žinant trajektoriją, apskaičiuoti padėčių dangaus sferoje lenteles (efemerides) skirtingu laiku. Dangaus mechanika taip pat nagrinėja įvairių dangaus kūnų (tarp jų ir dirbtinių) bei jų sistemų pusiausvyros figūras, jų deformacijas dėl potvynių poveikio.

Astrofizika tiria fizikinius ir cheminius procesus Saulės sistemos kūnuose, žvaigždėse, įvairaus rango jų sistemose, tarpžvaigždinėje materijoje, nagrinėja visų šių objektų sandarą, cheminę sudėtį, kilmę ir raidą. Astrofizika taip pat duoda žinių parengti šių objektų fizikinio tyrimo teorinius pagrindus ir praktinius metodus bei kurti aparatūrą. Astrofizikos dalis, tirianti visos Visatos prigimtį, sandarą, kilmę ir raidą, vadinama ***kosmologija***.

Matome, kad astrofizika yra nepaprastai plati ir įvairi, pati stambiausia

astronomijos dalis. Tačiau ji negali būti atskirta nuo kitų šakų – astrometrijos ir dangaus mechanikos, nes nuolat naudojasi jų rezultatais ir metodais; jos visos yra tarpusavyje glaudžiai persipynusios.

Astrofizika yra labai svarbi fizikos mokslo dalis, labai daug prisidėjusi prie fizikos mokslo ugdymo, jo raidos, daug gilesnio ir universalesnio fizikos dėsnių supratimo. Pavyzdžiui, žvaigždžių spektrų tyrimai sąlygojo jonizacijos teorijos raidą, žvaigždžių energijos šaltinių paieškos stimuliavo branduolinės fizikos atradimus, tarpžvaigždinės medžiagos spektrų analizė padėjo aptikti atomų metastabilias būsenas, kosminių mazerių tyrinėjimai prisideda prie kvantinės elektronikos raidos, glaudžių dvinarių pulsarų sistemų stebėjimai sutvirtino mūsų žinias apie gravitacines bangas, žvaigždžių aktyvumo reiškinių, supernovų ir jų likučių ūkų, planetų magnetosferų, neutroninių žvaigždžių magnetosferų, aktyviųjų galaktikų stebėjimai teikia duomenų apie magnetohidrodinamines bangas, sudėtingą plazmos sąveiką su magnetiniais laukais, elektringųjų dalelių greitinimą iki reliatyvistinių greičių, kosminių spindulių sąveiką su magnetiniais laukais, fotonais ir dujų dalelėmis. Gretinant reliktinių radijo fotonų charakteristikas su Metagalaktikos sandaros, jos plėtimosi duomenimis, kuriami ir tobulinami Mūsų Visatos kilmės ir evoliucijos scenarijai. O tai savo ruožtu daro didžiulę įtaką kuriant universaliąją fizikinę teoriją, jau pavadintą „M“ vardu, kuri, kaip tikimasi, aprėps visas ligšiolines fizikos teorijas, atskleis elementariųjų dalelių, kaip superstygų, prigimtį, pagilins mūsų žinias apie fizikinį vakuumą.

Dangaus kūnai ir jų sistemos yra ypač gera fizikos laboratorija, kurioje galima stebėti, kaip elgiasi materija esant nepaprastai įvairioms, kartais labai kraštutinėms, Žemės laboratorijose toli gražu neįgyvendinamoms sąlygoms. Štai dujos ir dulkelės kai kuriose molekulinių debesų vietose yra atšalusios iki 5–20 K. Ir priešingai, prieš pat supernovos sprogimą jos šerdyje temperatūra gali būti didesnė negu 10^{11} K. Vadinamųjų vainikinių dujų kontinuumas, užpildantis visą Galaktikos tūrį, yra tokio mažo tankio, kad kiekvienai šių dujų dalelei tenka po tūkstantį cm^3 tuščios erdvės. O neutroninių žvaigždžių viename cm^3 telpa net milijardas tonų masės. Astrofizikai susiduria su 10^{17} A/m stiprio magnetiniu lauku, su 10^{20} voltų elektrinio lauko įtampa, su 10^{20} amperų stiprio elektros srovėmis.

Astrofizikos laimėjimai įdomūs ir chemijos mokslui. Būtent naudojantis astrofizikos metodais, planetose, kometose, žvaigždėse, tarpžvaigždinėje medžiagoje randama daug įvairių molekulių ir radikalų. Tarp jų yra daug tokių, kurios įdomios organinei chemijai ir net biologijai, bandančiai įminti gyvybės atsiradimo paslaptį.

Tirdami planetas ir jų palydovus, matome, kad astronomija labai glaudžiai persipina su geologija, geofizika, geodezija, geochemija, geografija.

Galima sakyti, kad iš visų šių mokslų junginio susiformavo atskira planetas visapusiškai tirianti mokslo šaka – ***planetologija***.

Specifinis astronomijos bruožas – jos eksperimentų neįmanoma atlikti už Saulės sistemos ribų. O ir Saulės sistemos ribose eksperimentų galimybės kol kas dar nedidelės. Tai kosminių aparatų nusileidimai kai kuriuose Saulės sistemos kūnuose, jų radiolokacija, bandymai gaudyti ir tirti tarpžvaigždines ir tarpplanetines dulkeles bei molekules. Pro daugelį planetų, jų palydovų, asteroidų, kai kurias kometas erdvėlaiviai tik palyginti nedideliu atstumu praskriejo, į juos dar nepatekdami.

Taigi beveik visa informacija gaunama vien tik iš stebėjimų. Daugiausia informacijos teikia elektromagnetinės bangos. Dažniausiai naudojami regimosios šviesos, artimieji ultravioletiniai (UV) ir artimieji infraraudonieji (IR) spinduliai. Visi šie spinduliai sudaro vadinamąjį optinį spektro ruožą. Šiuos spindulius praleidžia atmosfera, ir todėl juos galima registruoti optiniais teleskopais iš Žemės paviršiaus. Tolimųjų UV ir tolimųjų IR spindulių Žemės atmosfera nepraleidžia. Jie registruojami optiniais teleskopais, erdvėlaivių iškeltais virš Žemės atmosferos arba balionų ir lėktuvų pakeltais į aukštutinius atmosferos sluoksnius. Rentgeno spinduliams registruoti reikia specialios konstrukcijos teleskopų, iškeltų virš atmosferos. Gama spinduliai registruojami jau nebe teleskopais, o specialiais skaitikliais, irgi iškeltais virš atmosferos. Milimetrines, centimetrines, metrines ir dekametrines radijo bangas priima radioteleskopai iš Žemės paviršiaus.

Informacijos atneša ir neutrinai, mus pasiekiantys iš Saulės ir iš supernovų gelmių. Įvairiuose erdvėlaiviuose įrengti specialūs detektoriai registruoja į Saulės sistemą patekusias kosminių spindulių daleles. Bandoma užregistruoti ir gravitacines bangas.

1
SKYRIUS

SFERINĖS ASTRONOMIJOS PAGRINDAI

Aloyzas Pučinskas

1.1. ŽVAIGŽDĖTASIS DANGUS IR JO PARINIS SUKIMASIS

Vakare, kai sutemsta, dangus sužaižaruoja, sakytum, nesuskaičiuojama daugybe žvaigždžių. Stebėtojas pasijunta tarsi būtų po milžinišku kupolu. Įspūdis labai stiprus, ir visiškai natūralu, kad kadaise manyta, jog iš tikrųjų Žemę gaubia reali žvaigždžių nusagstyta sfera. Dabar gerai žinoma: žvaigždės – tai tolimos saulės, nutolusios nuo Žemės įvairiausiais atstumais. Dideliu atstumu stebėtojo akys nepajėgia atskirti, kuri žvaigždė yra arčiau, kuri toliau, ir atrodo, tarsi visos jos būtų išsidėsčiusios vidiniame didelės sferos paviršiuje.

Virš horizonto paprasta akimi matyti ne daugiau kaip 3000 žvaigždžių. Žvaigždės juda erdvėje, bet dėl didelių atstumų daugumos jų danguje regimos tarpusavio padėtys kinta nepaprastai lėtai. Praktiškai mes matome tokį pat žvaigždėtą dangų, kokį jį matė žmonės, gyvenę prieš kelis tūkstančius metų. Tada žvaigždės padėjo žmonėms sekti laiką, numatyti sezoninių darbų pradžią, orientuotis tolimose kelionėse. Senovės astronomai jungdavo šviesesnes paslaptingojo dangaus žvaigždes į atskiras grupes – ***žvaigždynus*** ir juos pavadino gyvūnų, įvairių daiktų ir mitinių būtybių vardais. Daugelis senovinių žvaigždynų pavadinimų išliko iki šių dienų (Andromeda, Liūtas, Orionas, Persėjas, Strėlė ir t. t.). Kai kurioms labiau įsidėmėtinoms žvaigždžių konfigūracijoms lietuviai turėjo savo pavadinimus. Štai keletas geriausiai žinomų: Didieji ir Mažieji Grįžulo Ratai (Didžioji ir Mažoji Lokė), Šienpjoviai (Orionas), Darželis (Šiaurės Vainikas), Jukštandis (Kasiopėja). Dabar žvaigždyno sąvoka yra pasikeitusi: tai ne šviesesnių žvaigždžių grupė, o tiesiog dangaus sklypas su viskuo, kas jame yra. 1922 m. Tarptautinė astronomų sąjunga patikslino žvaigždynų ribas ir pavadinimus. Dabar visas dangus padalytas į 88 žvaigždynus. Jų sąrašas pateiktas knygos priedo 1-oje lentelėje.

Visos plika akimi matomos žvaigždės ir daug pro teleskopus stebimų žvaigždžių įrašyta į katalogus ir sužymėta žvaigždėlapiuose. Blyškesnės žvaigždės ir

vadinamos tais numeriais, kuriais jos pažymėtos plačiau paplitusiuose kataloguose. Šviesiausios kiekvieno atskiro žvaigždyno žvaigždės paženklintos dar ir graikų abėcėlės raidėmis. Nuo senų laikų per šimtą didelio spindesio žvaigždžių turi savo tikrinius vardus. Štai keletas pavyzdžių: Altairas (Erelio α), Kastoras (Dvynių α), Rigelis (Oriono β), Sirijus (Didžiojo Šuns α), Vega (Lyros α) ir t. t. Kai kurias žvaigždes lietuviai vadino savaip. Pavyzdžiui, Kapela (Vežėjo α) jiems buvo Tikutis.

Kai kurie šviesuliai nepaklūsta nusistovėjusiai žvaigždžių išsidėstymo tvarkai ir slankioja iš vieno žvaigždyno į kitą. Tai – Saulė, Mėnulis, planetos, kometos, dirbtiniai Žemės palydovai, meteorai. Nerimstantys žvaigždžių atžvilgiu šviesuliai yra daug arčiau už jas ir visi priklauso Saulės sistemai.

Per naktį, praleistą po atviru dangumi, galima įsitikinti, jog žvaigždėtasis dangus lėtai sukasi iš rytų į vakarus. Atidžiai apsižvalgę, galime nustatyti ir įsivaizduojamos sukimosi ašies, einančios per stebėtojo akį, kryptį. Šiaurės pusėje gerokai virš horizonto (jei stebėtojas yra, pavyzdžiui, Lietuvos teritorijoje) yra vieta, kur žvaigždės labai mažai tejuda. Aukščiau šios įsidėmėtinos vietos žvaigždės sukasi iš dešinės į kairę (kai stebėtojas stovi veidu į šiaurę), o žemiau – iš kairės į dešinę. Aišku, kažkur ties ta vieta reikia įsivaizduoti tašką, žymintį dangaus skliauto sukimosi ašies kryptį (smulkiau žr. **1.3**).

Žvaigždėto dangaus parinis sukimasis (apsisuka per parą) yra tik iliuzija. Ji kyla dėl to, kad Žemė (kartu ir stebėtojas) sukasi iš vakarų į rytus.

1.2. GEOGRAFINĖS KOORDINATĖS

Žvaigždėtojo dangaus vaizdas priklauso nuo stebėtojo vietos Žemės paviršiuje. Kurio nors šio paviršiaus taško padėtį nusako dvi koordinatės: geografinė ilguma λ ir geografinė platuma φ.

Geografinė ilguma λ – tai dvisienis kampas tarp pradinio (Grinvičo) dienovidinio ir tam tikro Žemės paviršiaus taško dienovidinio plokštumų. Ji matuojama nuo pradinio dienovidinio nuo 0° iki 360°, arba nuo 0^h iki 24^h. Geografinė ilguma, skaičiuojama į rytus, laikoma teigiama, o į vakarus – neigiama.

Geografinė platuma φ yra kampas tarp Žemės pusiaujo plokštumos ir vertikaliosios (einančios sunkio jėgos kryptimi) linijos, išvestos per tam tikrą Žemės paviršiaus tašką. Ji skaičiuojama nuo pusiaujo nuo 0° iki ±90° (teigiama – Šiaurės ašigalio kryptimi, neigiama – Pietų ašigalio kryptimi). Taip apibrėžta geografinė platuma nustatoma pagal astronominius stebėjimus, todėl ji kartais vadinama ***astronomine platuma****.

Žemės paplokštumas ir masių pasiskirstymo joje netolygumai nėra dideli (žr. **4.2**), todėl astronomijoje Žemė dažnai laikoma tiesiog vienalyčiu rutuliu. Tada tam tikro Žemės paviršiaus taško geografinę ilgumą galima matuoti

* Dar yra geodezinė ir geocentrinė platumos.

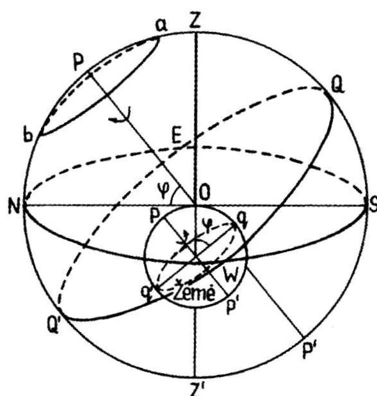
pusiaujo lanku nuo pradinio dienovidinio iki to taško dienovidinio, o geografinę platumą – šio dienovidinio lanku nuo pusiaujo iki pasirinktojo taško. Greitai ir tiksliai geografinės koordinatės nustatomos navigaciniais dirbtiniais Žemės palydovais ir atitinkama antžemine įranga.

1.3. DANGAUS SFERA

Stebėtojas apibūdina dangaus šviesulius visų pirma kryptimis, kuriomis jis tuos šviesulius mato. Kampai tarp tų krypčių nusako šviesulių tarpusavio padėtis. Praktikoje patogiau kryptis pakeisti taškais – šviesulių projekcijomis į regėjimo įspūdžio sukurtą sferinį paviršių. Tada šviesulių tarpusavio padėtį galima nusakyti didžiųjų apskritimų (jų plokštumos eina per sferos centrą), jungiančių jų projekcijas, lankais. Sferos spindulys čia neturi reikšmės. Taigi astronomai, jau seniai paneigę tikros žvaigždžių sferos egzistavimą, paliko ją kaip pagalbinę priemonę dangaus kūnų regimai padėčiai nustatyti.

Trumpai tariant, ***dangaus sfera*** – tai įsivaizduojama neriboto spindulio sfera, kurios centras gali būti bet kuriame erdvės taške. Šioje sferoje dangaus šviesuliai vaizduojami taip, kaip jie matomi iš to taško – sferos centro. Toliau dangaus sferos centrą susiesime su realaus stebėtojo, esančio Žemės paviršiuje, akimi. Matavimai dangaus sferoje atliekami tiktai lanko arba kampo matais. Tiksliems matavimams yra sudėtingi prietaisai, tačiau apytikriam kampinių atstumų dangaus sferoje įvertinimui galima pasitelkti, pavyzdžiui, regimuosius Saulės ar Mėnulio skersmenis, kurie maždaug yra 0,5°.

Konkrečios šviesulių padėtys nusakomos tam tikrų įsivaizduojamų dangaus sferos taškų bei apskritimų atžvilgiu. Pagrindiniai dangaus sferos elementai yra parodyti **1.1** pav. Čia sferos centras (stebėtojas) yra Žemės paviršiaus taške *O*. Vertikalioji linija, išvesta per šį tašką, kerta dangaus sferą dviejuose diametraliai priešinguose taškuose: ***zenite Z*** ir ***nadyre Z′*** (arab. *nadir* – esantis priešais). Zenitas yra tiesiai virš galvos, o nadyrą užstoja Žemės rutulys. Didysis dangaus sferos apskritimas *SWNE*, kurio plokštuma yra statmena vertikaliajai linijai, vadinamas ***matematiniu***, arba ***tikruoju***, ***horizontu***. Matematinio horizonto negalima tapatinti su ***regimuoju***, arba ***fiziniu***, ***horizontu***, t. y. linija, kuria, kaip mums atrodo, dangus liečiasi su Žemės paviršiaus dariniais. Sausumoje regimasis horizontas eina arba aukščiau, arba žemiau, o atviroje jūroje visada žemiau matematinio horizonto ir dalija dangų į matomą ir nematomą dalis.



1.1 pav. *Žemė ir pagrindiniai dangaus sferos elementai*

Linija *PP′*, apie kurią sukasi dangaus

sfera, vadinama ***dangaus ašimi***. Taškai, kuriuose ši ašis kerta dangaus sferą, vadinami ***dangaus poliais***. Polius, nuo kurio žvelgiant dangaus sukimosi kryptis sutampa su laikrodžio rodyklių sukimosi kryptimi, laikomas šiauriniu dangaus poliumi P, priešingas (mums nematomas) – pietiniu dangaus poliumi P'. Mūsų laikais šiaurinis dangaus polius yra maždaug 1° atstumu nuo šviesios Mažųjų Grįžulo Ratų α žvaigždės. Dėl savo išskirtinės padėties ši žvaigždė ir vadinama ***Šiaurine***. Pietinis dangaus polius yra Oktanto žvaigždyne.

Žemės rutulys yra be galo mažas palyginti su atstumais iki žvaigždžių, todėl ta pati žvaigždė (dangaus sferos taškas) iš visų Žemės paviršiaus vietų yra matoma lygiagrečiomis kryptimis. Lygiai tą patį galima pasakyti apie visas kryptis į dangaus polių: dangaus ašis, kad ir kurį Žemės tašką bepasirinktume dangaus sferos centru, visada yra lygiagreti Žemės sukimosi ašiai pp'. Todėl nesunku įsitikinti (**1.1** pav.), kad **dangaus poliaus aukštis virš matematinio horizonto** (dangaus ašies posvyris į horizonto plokštumą) **yra lygus stebėjimo vietos geografinei (astronominei) platumai φ.**

Didysis dangaus sferos apskritimas $QWQ'E$, kurio plokštuma yra statmena dangaus ašiai (lygiagreti Žemės pusiaujo qq' plokštumai), vadinamas ***dangaus pusiauju***. Dangaus pusiaujas dalija dangų į dvi lygias dalis: šiaurinę ir pietinę. Dangaus pusiaujas susikerta su matematiniu horizontu ***rytų taške E*** ir ***vakarų taške W***.

Mažieji dangaus sferos apskritimai (pvz., ab), kurių plokštumos yra lygiagrečios dangaus pusiaujo plokštumai, vadinami ***dangaus***, arba ***parinėmis***, ***lygiagretėmis***. Jomis vyksta regimasis šviesulių judėjimas aplink dangaus ašį.

Didysis dangaus sferos apskritimas $PZQSP'Z'Q'N$, kurio plokštuma eina per vertikaliąją liniją ir dangaus ašį, vadinamas ***dangaus dienovidiniu***. Jo ir matematinio horizonto plokštumų susikirtimo linija vadinama ***vidurdienio linija***. Ji rodo stebėtojo vietos Žemės dienovidinio kryptį ir kerta matematinį horizontą ***šiaurės taške N*** ir ***pietų taške S***. Šiaurės tašku laikomas tas, kuris yra arčiau šiaurinio dangaus poliaus, o pietų tašku – kuris yra arčiau pietinio dangaus poliaus.

Dangaus ašis dalija dangaus dienovidinį pusiau. Toji dangaus dienovidinio pusė, kurioje yra zenitas, laikoma jo viršutine dalimi, o ta pusė, kurioje nadyras – apatine dalimi.

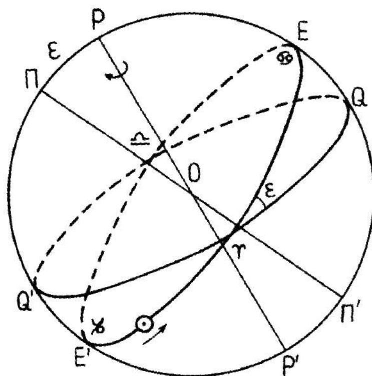
Šviesulys, slinkdamas dangaus lygiagrete, du kartus per parą kerta dangaus dienovidinį. Šviesulio perėjimas per dangaus dienovidinį vadinamas jo ***kulminacija***. Skiriama ***viršutinė kulminacija***, kai šviesulys pereina viršutinę dangaus dienovidinio dalį, ir ***apatinė kulminacija***, kai šviesulys pereina apatinę dangaus dienovidinio dalį (**1.1** pav., atitinkamai a ir b).

1.4. EKLIPTIKA. METŲ LAIKŲ KAITA

Žvaigždės pateka ir nusileidžia visada tose pačiose horizonto vietose (jei stebima iš to paties taško), kulminuoja visada vienodame aukštyje, t. y. jos visą laiką sukasi tomis pačiomis dangaus lygiagretėmis. O Saulės patekėjimo ir nusileidimo vietos, taip pat jos aukštis vidurdienį nuolatos kinta. Vadinasi, nuolat kinta ir Saulės padėtis žvaigždžių atžvilgiu. Tikslesnį vaizdą apie Saulės judėjimą žvaigždžių fone galima susidaryti per visus metus stebint žvaigždėtą dangų vienu ir tuo pačiu nakties laiku. Jau po savaitės kitos aiškėja, kad dangaus sfera lėtai sukasi iš rytų į vakarus (tai ne parinis sukimasis!): virš rytų horizonto pasirodo nauji žvaigždynai (pirmasis žvaigždės pasirodymas ryto aušroje vadinamas ***heliakaliniu patekėjimu***), o anksčiau aukštai spindėję žvaigždynai palaipsniui slepiasi už vakarų horizonto. Po metų žvaigždynai vėl užima tą pačią padėtį, kaip pirmąją stebėjimų naktį. Aišku, taip yra todėl, kad Saulė (nuo jos padėties priklauso paros metas) juda žvaigždžių atžvilgiu iš vakarų į rytus ir visą ratą padaro per vienerius metus, t. y. per parą paslenka maždaug 1°. Saulės skritulio centras juda didžiuoju dangaus sferos apskritimu, vadinamu ***ekliptika*** (gr. *ekleipsis* – užtemimas). Ekliptikos plokštuma yra pasvirusi į dangaus pusiaujo plokštumą kampu $\varepsilon = 23°26'$*.

Linija ΠΠ′ (**1.2** pav.), statmena ekliptikos *EE′* plokštumai ir einanti per dangaus sferos centrą, vadinama ***ekliptikos ašimi***, o jos susikirtimo su dangaus sfera taškai – ***ekliptikos poliais***: šiauriniame danguje yra šiaurinis ekliptikos polius Π, o pietiniame – pietinis ekliptikos polius Π′. Ekliptikos poliai yra 23°26′ atstumu nuo dangaus polių: šiaurinis ekliptikos polius įeina į Slibino žvaigždyną (yra arti žvaigždės, pažymėtos raide δ), o pietinis – į Aukso Žuvies žvaigždyną.

Ekliptikos ir dangaus pusiaujo susikirtimo taškai vadinami ***lygiadienių***, arba ***ekvinokcijų*** (lot. *aequus* – lygus + *nox* – naktis), ***taškais***. Viename jų, ***pavasario lygiadienio taške*** ♈, Saulė pereina iš pietinio dangaus į šiaurinį (**1.2** pav. rodyklė prie Saulės ženklo ☉ rodo jos regimojo metinio judėjimo kryptį), o priešingame, ***rudens lygiadienio taške*** ♎, – iš šiaurinio į pietinį. Ekliptikos taškai, nutolę 90° nuo lygiadienių taškų, vadinami ***saulėgrįžų***, arba ***solsticijų*** (lot. *solstitium* – Saulės stovėjimas),



1.2 pav. *Ekliptika*

* Tai suapvalinta kampo ε reikšmė. 2000 m. pradžioje jis buvo lygus 23° 26′21″,41 (kampas ε dabar mažėja 0″,47 per metus (žr. **2.18**).

taškais: šiaurinėje dangaus dalyje yra *vasaros* saulėgrįžos taškas ♋, o pietinėje – *žiemos* saulėgrįžos taškas ♑.

Lygiadienių ir saulėgrįžų taškai ir dabar žymimi tais pačiais ženklais, kaip maždaug prieš 2000 metų, t. y. žvaigždynų, kuriuose tais laikais buvo šie taškai, ženklais: ženklai ♈, ♋, ♎ ir ♑ reiškia atitinkamai Avino, Vėžio, Svarstyklių ir Ožiaragio žvaigždynus. Dabar pavasario lygiadienio taškas ♈ yra Žuvų žvaigždyne, vasaros saulėgrįžos taškas ♋ – Tauro žvaigždyne, rudens lygiadienio taškas ♎ – Mergelės žvaigždyne ir žiemos saulėgrįžos taškas ♑ – Šaulio žvaigždyne. Apie šių taškų judėjimo priežastis žr. **2.18**.

Ekliptika kerta 13 žvaigždynų: pavasarį Saulė slenka Žuvų, Avino ir Tauro žvaigždynais, vasarą – Dvynių, Vėžio ir Liūto žvaigždynais, rudenį – Mergelės, Svarstyklių, Skorpiono ir Gyvatnešio žvaigždynais, žiemą – Šaulio, Ožiaragio ir Vandenio žvaigždynais.

Dangaus sferos juosta, kurios viduriu eina ekliptika, jau nuo seno traukė dėmesį, nes čia, be Saulės, dar juda Mėnulis, klaidžioja planetos. Beveik visų čia esančių žvaigždynų pavadinimai susieti su tikromis ar išgalvotomis gyvomis būtybėmis. Neatsitiktinai ši maždaug 16° pločio juosta buvo pavadinta ***Zodiaku*** (gr. *zoon* – gyvūnas). Istoriškai Zodiakui priskiriama 12 žvaigždynų (pagal metų mėnesių skaičių); tarp jų nepatenka Gyvatnešis.

Ekliptika yra lyg pritvirtinta prie dangaus sferos ir sukasi kartu su ja.

Metinis Saulės judėjimas ekliptika tėra tiktai regimasis reiškinys, tikrojo Žemės skriejimo aplink Saulę atspindys. Ekliptika – tai visuma dangaus sferos taškų, į kuriuos skriejantis Žemės orbita stebėtojas projektuoja Saulės skritulio centrą. Kitais žodžiais tariant, ekliptika yra linija, kuria dangaus sfera kertasi su Žemės orbitos plokštuma. Kampas ε yra tas pats, kas kampas tarp Žemės pusiaujo ir Žemės orbitos (tolygu ekliptikos) plokštumų (Žemės pusiaujo ir dangaus pusiaujo plokštumos yra lygiagrečios).

Visiems, ypač vidutinių platumų gyventojams gerai pažįstamas periodiškai pasikartojantis šilumos režimo kitimas, t. y. **metų laikų kaita**. Metų laikai seka metinį kulminuojančios Saulės aukščio kitimą, susietą su ekliptikos posvyriu į dangaus pusiaują. O tikrosios metų laikų kitimo priežastys yra trys: Žemės skriejimas aplink Saulę, Žemės pusiaujo plokštumos arba Žemės sukimosi ašies posvyris į jos orbitos plokštumą (atitinkamai kampu ε arba $90°-\varepsilon$) ir Žemės sukimosi ašies orientacijos erdvėje pastovumas (mažą jos pokytį galima pastebėti tik po daugelio metų (žr. **2.18**).

Kai Saulė būna lygiadienių taškuose, plokštuma, skirianti apšviestą Žemės pusę nuo neapšviestos, eina per Žemės sukimosi ašį: šiaurinis ir pietinis Žemės pusrutuliai gauna vienodai šilumos. Abiejų pusrutulių apšvietos sąlygos labiausiai skiriasi Saulei esant saulėgrįžų taškuose, tuomet viename pusrutulyje Saulė yra maksimaliame aukštyje, o kitame – minimaliame. Po pusės metų pusrutuliai pasikeičia vaidmenimis: ten, kur buvo vasara, dabar žiema ir atvirkščiai, nes Žemės sukimosi ašies kryptis liko ta pati.

Šiauriniame Žemės pusrutulyje rudens – žiemos sezonas trunka 179 paras, o pavasario – vasaros sezonas ilgiau – 186 paras. Vadinasi, ekliptikos dalį, esančią pietiniame danguje, Saulė pereina greičiau negu dalį, priklausančią šiauriniam dangui. Tai rodo, jog Saulės slinkimo greitis įvairiose ekliptikos vietose yra nevienodas. Savo ruožtu tai yra atspindys netolygaus Žemės skriejimo aplink Saulę, nes jos orbita yra ne apskritimas, o elipsė. Žemė būna arčiausiai Saulės ir skrieja didžiausiu greičiu sausio pradžioje, o jos didžiausias atstumas ir mažiausias greitis būna liepos pradžioje. Saulės atstumo kitimas (lygus 5 mln. km) tiktai šiek tiek mažina mūsų žiemų speigus ir vasarų kaitrą. Pietiniame Žemės pusrutulyje šis faktorius veikia atvirkščiai – šiek tiek sustiprina kontrastą tarp žiemos ir vasaros.

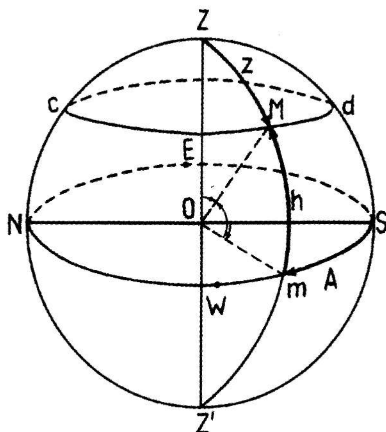
1.5. ASTRONOMINIŲ KOORDINAČIŲ SISTEMOS

Dangaus šviesulių (dangaus sferos taškų) padėtys nusakomos dviem sferinėmis koordinatėmis, t. y. dviem didžiųjų dangaus sferos apskritimų lankais, atskaitomais nuo pasirinktų pagrindinių dangaus sferos elementų. Astronomijoje priklausomai nuo tikslų naudojamasi keliomis dangaus koordinačių sistemomis.

1.5.1. Horizontinė astronominių koordinačių sistema

Šioje sistemoje šviesulių padėtis nustatoma matematinio horizonto ir dangaus dienovidinio atžvilgiu. Horizontinėje sistemoje koordinačių tinklą sudaro ***vertikalai***, arba ***aukščio apskritimai***, ir ***almukantarai*** (arab. *al muqantar* – skliautuotas), arba ***vienodo aukščio apskritimai***. Vertikalais vadinami didieji dangaus sferos pusapskritimiai, nubrėžti nuo zenito iki nadyro, o almukantarais – mažieji dangaus sferos apskritimai, kurių plokštumos yra lygiagrečios su matematinio horizonto plokštuma (**1.3** pav., *cd*). Vertikalai, einantys per vakarų ir rytų taškus, vadinami ***pirmaisiais vertikalais***.

Horizontinėje koordinačių sistemoje šviesulio M (**1.3** pav.) padėtį nusako ***aukštis h*** ir ***azimutas A*** (arab. *as sumut* – kryptys). Aukščiu h vadinamas vertikalo $ZMmZ'$, išvesto per šviesulį, lankas mM nuo matematinio horizonto iki šviesulio, o azimutu



1.3 pav. *Horizontinė koordinačių sistema*

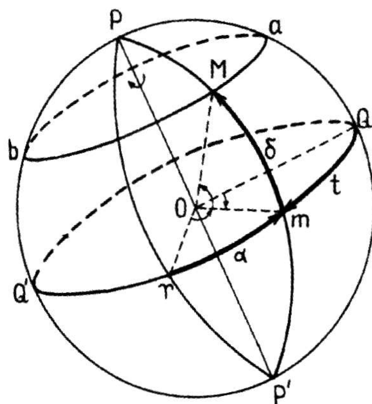
A – matematinio horizonto lankas *Sm* nuo pietų taško *S* iki šviesulio vertikalo ir horizonto susikirtimo taško *m*. Dažnai vietoje aukščio *h* naudojama kita koordinatė – ***zenitinis nuotolis*** *z*, t. y. vertikalo lankas *ZM* nuo zenito iki šviesulio.

Aukštis *h* matuojamas į abi puses nuo matematinio horizonto nuo 0° iki ±90°: virš horizonto $h > 0$, o po horizontu $h < 0$. Zenitinis nuotolis *z* matuojamas nuo zenito nadyro link nuo 0° iki 180°. Visada $z = 90° - h$. Azimutas *A* matuojamas nuo pietų taško *S* į vakarus nuo 0° iki 360°. Kartais azimutas matuojamas nuo pietų taško į vakarus nuo 0° iki +180° ir į rytus nuo 0° iki –180°. Geodezijoje azimutai skaičiuojami nuo šiaurės taško *N*.

Šviesulio azimutas ir zenitinis nuotolis (rečiau aukštis) išmatuojami tiesiogiai su specialiais kampų matavimo prietaisais, panašiais į geodeziniams darbams naudojamą prietaisą – teodolitą. Dėl parinio dangaus sferos sukimosi šviesulių horizontinės koordinatės nepaliaujamai kinta. Galima laikyti, kad dangaus sfera sukasi tolygiai, tačiau dėl šviesulių parinių lygiagrečių posvyrio į horizontą horizontinių koordinačių kitimas yra netolygus: azimutas kinta greičiausiai, o zenitinis nuotolis (aukštis) lėčiausiai būnant šviesuliams arti dangaus dienovidinio (kulminuojant). Kintančios horizontinės koordinatės netinka sudarant dangaus objektų katalogus ir žvaigždėlapius, bet jos labai vaizdžiai nusako šviesulių matomumo sąlygas tam tikru momentu.

1.5.2. Pirmoji pusiaujinė astronominių koordinačių sistema

Šios sistemos pagrindą sudaro dangaus pusiaujas, o papildomas atskaitos elementas yra dangaus dienovidinis. Didieji dangaus sferos pusapskritimiai, jungiantys šiaurinį ir pietinį dangaus polius, vadinami ***deklinacijos***, arba ***valandiniais***, ***apskritimais***, nors tiksliai pagal apibrėžimą yra pusapskritimiai. Jie kartu su dangaus lygiagretėmis sudaro pusiaujinės sistemos koordinačių tinklą.



1.4 pav. *Pusiaujinės koordinačių sistemos*

Deklinacijos apskritimo *PMmP'* (**1.4** pav.), išvesto per šviesulį *M*, lankas *mM* nuo dangaus pusiaujo iki šviesulio rodo pirmą koordinatę – ***deklinaciją* δ** (lot. *declinatio* – nukrypimas), o dangaus pusiaujo lankas *Qm* nuo dangaus dienovidinio pietinės pusės iki šviesulio deklinacijos apskritimo – antrą koordinatę, ***valandinį kampą t***.

Deklinacija skaičiuojama į abi puses nuo dangaus pusiaujo nuo 0° iki ±90°: šiaurinėje

dangaus dalyje $\delta > 0$, o pietinėje $\delta < 0$. Valandinis kampas t skaičiuojamas nuo aukščiausio dangaus pusiaujo taško Q į vakarus, t. y. dangaus sferos parinio sukimosi kryptimi nuo 0° iki 360°.

Kadangi parinis šviesulių judėjimas vyksta dangaus lygiagretėmis (**1.4** pav., *ab*), tai, sukantis dangaus sferai, šviesulių deklinacija išlieka vienoda, o valandinis kampas kinta tolygiai, t. y. proporcingai laikui. Todėl patogu valandinį kampą išreikšti ne laipsniniais vienetais, bet kampų matavimo vienetais su laiko vienetų pavadinimais – valandomis (h), minutėmis (m), sekundėmis (s). Tarp skirtingų kampų matavimo vienetų yra lengvai įsimenami sąryšiai: $1^h = 15°$, $1^m = 15'$, $1^s = 15''$, $1° = 4^m$, $1' = 4^s$, $1'' = 1/15^s$.

Tolygiai kintantis šviesulių valandinis kampas naudojamas laikui nustatyti, ši koordinatė taip pat labai reikalinga astronomams, sudarantiems šviesulių stebėjimo programas.

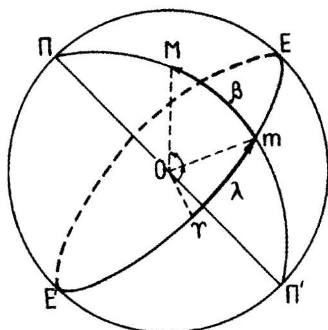
1.5.3. Antroji pusiaujinė astronominių koordinačių sistema

Dangaus lygiagrečių ir deklinacijos apskritimų tinklas sukasi kartu su visa dangaus sfera. Taigi norint vietoj kintančio valandinio kampo pasirinkti nepriklausomą nuo dangaus parinio sukimosi koordinatę, reikia lanką atskaityti ne nuo nejudančio dangaus dienovidinio, bet nuo kažkurio deklinacijos apskritimo. Pradiniu deklinacijos apskritimu laikomas deklinacijos apskritimas, einantis per pavasario lygiadienio tašką. Vadinasi, antrąja pusiaujinės sistemos koordinate (šalia deklinacijos δ) gali būti dangaus pusiaujo lankas Υm (**1.4** pav.) tarp taškų, kuriuose jis kertasi su pavasario lygiadienio taško Υ ir šviesulio M deklinacijos apskritimais. Ši koordinatė vadinama ***rektascensija*** (lot. *rectus* – tiesus + *ascensio* – pakilimas) ir žymima raide α. Rektascensija α matuojama nuo pavasario lygiadienio taško Υ į rytus, t. y. priešinga dangaus sferos sukimosi kryptimi nuo 0^h iki 24^h arba labai retai nuo 0° iki 360°.

Nuo stebėjimo laiko ir vietos nepriklausomos koordinatės – rektascensija ir deklinacija sudaro antrąją pusiaujinę astronominių koordinačių sistemą. Pagal šias koordinates sudaromi dangaus šviesulių katalogai bei žvaigždėlapiai (žr. **2.1** pav., kuriame panaudota žvaigždėlapio dalis). Pusiaujinės koordinatės tiesiogiai nematuojamos, o yra išvedamos remiantis kitokiais stebėjimais (žr. **1.20**).

1.5.4. Ekliptinė astronominių koordinačių sistema

Kartais, ypač stebint Saulės sistemos kūnų judėjimą, paranku turėti koordinačių sistemą, kurios pagrindu yra paimta ekliptika. Šviesulio M (**1.5** pav.) padėčiai tokioje sistemoje nustatyti per ekliptikos polius ir šviesulį brėžiamas



1.5 pav. *Ekliptinė koordinačių sistema*

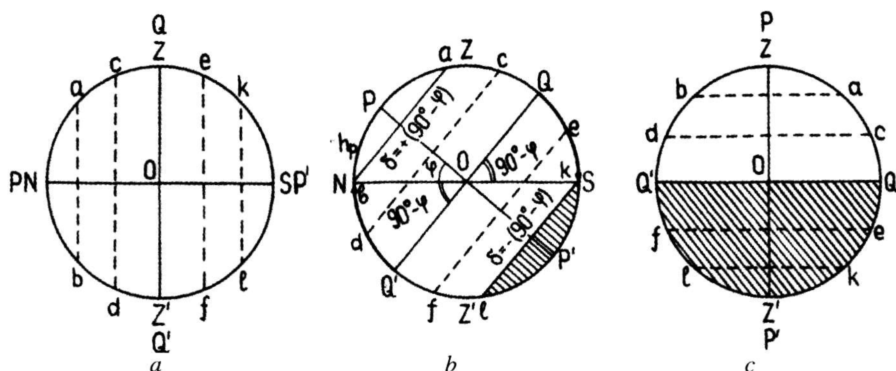
didysis dangaus sferos pusapskritimis $\Pi M m \Pi'$ – ***ekliptinės platumos apskritimas***. Šio apskritimo lankas mM nuo ekliptikos iki šviesulio yra laikomas ***ekliptine platuma* β**, o ekliptikos lankas ♈m nuo pavasario lygiadienio taško iki šviesulio ekliptinės platumos apskritimo – ***ekliptine ilguma* λ**.

Ekliptinė platuma β skaičiuojama į abi puses nuo ekliptikos nuo 0° iki ±90°: šiaurinio ekliptikos poliaus link $\beta > 0$, o pietinio ekliptikos poliaus kryptimi $\beta < 0$. Ekliptinė ilguma λ skaičiuojama nuo pavasario lygiadienio taško į rytus, t. y. metinio Saulės judėjimo kryptimi nuo 0° iki 360°.

Parinis dangaus sferos sukimasis neturi įtakos ekliptinėms šviesulių koordinatėms, nes šios sistemos atskaitos elementai taip pat sukasi apie dangaus ašį.

1.6. ŽVAIGŽDĖTASIS DANGUS ĮVAIRIOSE GEOGRAFINĖSE PLATUMOSE

Dangaus poliaus aukštis h_p kurioje nors stebėjimo vietovėje, kaip matėme (žr. 1.3), yra lygus šios vietovės geografinei platumai φ. Vadinasi, pereinant iš vienos platumos į kitą, turi pasikeisti žvaigždėtojo dangaus bendra išvaizda bei šviesulių parinio judėjimo horizonto atžvilgiu pobūdis. Pradėkime nuo Žemės pusiaujo ($\varphi = h_p = 0°$). Čia (1.6 pav., *a*) dangaus ašis yra matematinio horizonto plokštumoje, šiaurinis dangaus polius P sutampa su šiaurės tašku N, pietinis dangaus polius P' – su pietų tašku S, dangaus pusiaujas QQ' eina per zenitą Z ir nadyrą Z', jo ir visų dangaus lygiagrečių (pvz., ab) plokštumos



1.6 pav. *Dangaus sfera (jos projekcija į dienovidinio plokštumą) įvairiose geografinėse platumose: a)* $\varphi = 0°$, *b)* $0° < \varphi < +90°$, *c)* $\varphi = +90°$

statmenos matematinio horizonto plokštumai. Čia visi šviesuliai pateka ir nusileidžia statmenai horizontui, o virš jo (ar po juo) išbūna pusę paros. Iš Žemės pusiaujo matyti ir šiaurinė, ir pietinė dangaus sferos pusės.

Stebėtojui tolstant nuo pusiaujo ir artėjant, pavyzdžiui, prie Šiaurės ašigalio, šiaurinis dangaus polius kyla vis aukščiau, pietinis dangaus polius smunka vis giliau po horizontu, o dangaus pusiaujas ir dangaus lygiagretės vis labiau krypsta į horizontą (**1.6** pav., *b*). Šiaurinio dangaus poliaus aplinkoje šviesulių parinės lygiagretės yra virš horizonto, o pietinio poliaus aplinkoje – po horizontu. Šias dangaus sferos sritis nuo likusios dalies skiria dangaus lygiagretės, atitinkančios deklinaciją $\delta = \pm(90° - \varphi)$ (**1.6** pav., *b*, *ab* ir *kl*). Vadinasi, jeigu šviesulių deklinacija

$$|\delta| \geq 90° - \varphi, \qquad (1.1)$$

jie toje geografinėje platumoje visą laiką yra arba virš horizonto ($\delta > 0$), arba po horizontu ($\delta < 0$). Pirmuoju atveju šviesuliai bus ***nenusileidžiantys***, antruoju – ***nepatekantys***. Šviesuliai pateka ir nusileidžia, jeigu jų deklinacija

$$|\delta| < 90° - \varphi\,. \qquad (1.2)$$

Nesunku įrodyti, jog, kai šviesulių deklinacija $\delta = \varphi$, jie kulminuoja zenite. Kai $\delta < \varphi$, šviesuliai kulminuoja į pietus nuo zenito (**1.6** pav., *b*, taškuose *c*, *e* ir *k*), tada jų zenitinis nuotolis

$$z = \varphi - \delta \quad (\text{arba} \quad h = 90° - \varphi + \delta). \qquad (1.3)$$

Kai $\delta > \varphi$, šviesulių viršutinė kulminacija vyksta į šiaurę nuo zenito, t. y. tarp zenito ir šiaurinio dangaus poliaus (**1.6** pav., *b*, taške *a*), o jų

$$z = \delta - \varphi \quad (\text{arba} \quad h = 90° + \varphi - \delta). \qquad (1.4)$$

Kada nenusileidžiantys šviesuliai yra apatinėje kulminacijoje (**1.6** pav., *b*, tarp *P* ir *N*), jų

$$z = 180° - \varphi - \delta \quad (\text{arba} \quad h = \varphi + \delta - 90°). \qquad (1.5)$$

Šviesuliai, esantys dangaus pusiaujyje, virš horizonto matomi pusę paros. Pietinio dangaus šviesuliai virš horizonto išbūna trumpiau negu po juo (**1.6** pav., *b*, *ef*), o šiaurinio dangaus šviesuliai, atvirkščiai, virš horizonto būna didesnę paros dalį negu po horizontu (**1.6** pav., *b*, *cd*). Kuo arčiau Šiaurės ašigalis, tuo didesni dangaus sferos segmentai su nenusileidžiančiais ir nepatekančiais šviesuliais, tuo mažesnė pietinio dangaus dalis pasirodo virš horizonto.

Šiaurės ašigalyje ($\varphi = +90°$) dangaus ašis sutampa su vertikaliąja linija, šiaurinis dangaus polius – su zenitu, dangaus pusiaujas – su matematiniu horizontu (praranda prasmę dangaus dienovidinis, šiaurės, rytų, pietų ir vakarų taškai), o dangaus lygiagretės – su almukantarais (**1.6** pav., *c*). Čia parinis šviesulių judėjimas vyksta nekintant jų aukščiui *h*, o visi pietinio dangaus šviesuliai yra nepatekantys. Aišku, Pietų ašigalyje ($\varphi = -90°$) niekada nesimato šiaurinio dangaus šviesulių.

1.7. ASTRONOMINĖ REFRAKCIJA

Stebėtasis šviesulio zenitinis nuotolis ir apskaičiuotasis pagal (1.3)–(1.5) formules skiriasi, nes šviesos spindulys, patekęs tam tikru kampu į Žemės atmosferą, lūžta ir, toliau lėkdamas pro tankėjančius atmosferos sluoksnius, vis labiau tolsta nuo pradinės krypties. Žemės paviršiaus taške O esantis stebėtojas (1.7 pav.) mato šviesulį M ne tikrojoje jo padėtyje, o truputį arčiau zenito Z padėtyje M'. Dangaus kūnų šviesos spindulių sklidimo krypties pakitimas Žemės atmosferoje vadinamas ***astronomine refrakcija*** (lot. *refractio* – lūžimas). Ši reiškinį apibūdinantis kampas MOM' vadinamas ***refrakcijos kampu***, arba tiesiog ***refrakcija*** **ρ**. Matyti, jog $\rho = z - z'$, čia z – tikrasis šviesulio zenitinis nuotolis, z' – jo regimasis zenitinis nuotolis. Taigi šviesulio tikrasis zenitinis nuotolis

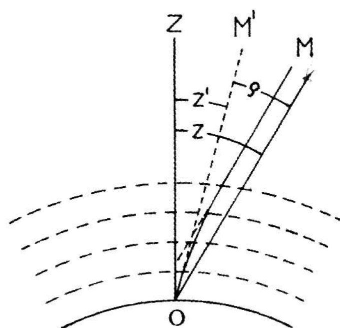
$$z = z' + \rho. \qquad (1.6)$$

Refrakcijos dydis priklauso nuo šviesulio zenitinio nuotolio, taip pat nuo atmosferos slėgio ir oro temperatūros. Kai slėgis yra 760 mm Hg ir temperatūra +10 °C, refrakciją galima įvertinti pagal šią formulę:

$$\rho = 58'',2 \text{ tg } z'. \qquad (1.7)$$

Ši formulė netinka, kai šviesulio regimasis zenitinis nuotolis $z' > 70°$. Tada naudojamasi specialiai (teoriškai ir remiantis stebėjimais) sudarytomis refrakcijos lentelėmis. Horizonte refrakcija $\rho \approx 35'$, t. y. didesnė už regimusius Saulės ir Mėnulio skersmenis.

Astronominė refrakcija, sąlygojama šviesos lūžio dėsnių, keičia šviesulio padėtį tiktai vertikalia kryptimi, t. y. keičia šviesulio zenitinį nuotolį arba aukštį, o jo azimuto nepaliečia. O pusiaujinėje koordinačių sistemoje refrakcija keičia abi šviesulio koordinates, išskyrus kulminacijos momentus, kai iškreipiama tiktai deklinacija, o rektascensija lieka nepakitus (regimosios ir tikrosios šviesulio padėčių deklinacijos apskritimai sutampa).



1.7 pav. *Astronominė refrakcija*

Į refrakciją būtina atsižvelgti nustatant šviesulių koordinates. Dėl refrakcijos šviesuliai pateka anksčiau ir nusileidžia vėliau, negu tai būtų be atmosferos. Vadinasi, astronominė refrakcija pailgina dieną ir sutrumpina naktį (žr. 1.8). Prie pat horizonto Saulė ir Mėnulis atrodo kiek suploti, juk tada jų apatinio krašto refrakcija maždaug 6′ didesnė už viršutinio krašto refrakciją (horizontalia kryptimi refrakcijos nėra).

1.8. SAULĖ ĮVAIRIOSE GEOGRAFINĖSE PLATUMOSE

Slenkančios ekliptika Saulės pusiaujinės koordinatės nepaliaujamai kinta. Rektascensija visus metus kinta viena linkme – didėja, o deklinacija per tą laiką atlieka visą svyravimą intervalu nuo $+23°26'$ iki $-23°26'$ (reikšmės lygios kampui ε). Žinant Saulės koordinačių kitimo pobūdį ir prisimenant tai, kas buvo pasakyta **1.6** poskyryje, galima aprašyti Saulės parinį judėjimą horizonto atžvilgiu skirtingose geografinėse platumose įvairiu metų laiku.

Kovo 21 d. (kartais 20 d.) Saulė būna pavasario lygiadienio taške ($\alpha = 0°$, $\delta = 0°$) ir pereina iš pietinio dangaus į šiaurinį. Ši diena vadinama ***pavasario lygiadieniu***: visame Žemės rutulyje diena lygi nakčiai. Tam tikroje geografinėje platumoje φ Saulės aukštis vidurdienį $h_{\odot} = 90° - |\varphi|$ (žr. (**1.3**) ir (**1.4**) formules). Žemės pusiaujyje Saulė kulminuoja zenite, o ašigaliuose ji matoma matematiniame horizonte (Šiaurės ašigalyje Saulė pateka, o Pietų – nusileidžia). Šiauriniame Žemės pusrutulyje prasideda astronominis pavasaris, o pietiniame – astronominis ruduo.

Saulei perėjus į šiaurinį dangų ($\delta_{\odot} > 0$), šiauriniame Žemės pusrutulyje dienos darosi ilgesnės už naktis, o pietiniame, atvirkščiai, naktys lenkia dienas. Tam tikrą dieną Saulė kulminuoja zenite tose vietovėse, kurių platuma yra lygi tos dienos Saulės deklinacijai $\delta_{\odot}$ (žr. **1.6**). Artėjant prie Šiaurės ašigalio, diena darosi vis ilgesnė, ir pagaliau platumose $\varphi \geq +(90° - \delta_{\odot})$ (žr. (**1.1**) formulę) Saulė tampa nenusileidžiančiu šviesuliu – prasideda poliarinių, t. y. trunkančių ilgiau kaip 24 valandas dienų zona. Pačiame ašigalyje Saulė brėžia beveik lygiagretų horizontui ratą aukštyje $h_{\odot} = \delta_{\odot}$. Artėjant prie Pietų ašigalio, naktys darosi vis ilgesnės, o kai $\varphi < -(90° - \delta_{\odot})$, Saulė visai nepasirodo virš horizonto – ten poliarinė naktis.

Birželio 22 d. (kartais 21 d.) Saulė pasiekia vasaros saulėgrįžos tašką ($\alpha = 6^h$, $\delta = +23°26'$). Šiuo momentu šiauriniame Žemės pusrutulyje ilgiausia diena ir trumpiausia naktis, o pietiniame, atvirkščiai, ilgiausia naktis ir trumpiausia diena. Vidurdienį Saulė siekia zenitą geografinėje platumoje $\varphi = +23°26'$. Šiauriau šios platumos Saulės aukštis vidurdienį $h_{\odot} = 90° - \varphi + 23°26'$, o piečiau $h_{\odot} = 90° + \varphi - 23°26'$. Poliarinės dienos zona atslenka iki $\varphi = +(90° - 23°26') = +66°34'$, atitinkamai poliarinė naktis prasideda nuo $\varphi = -66°34'$. Šiaurės ašigalyje Saulė yra maksimaliame aukštyje (23°26'). ***Vasaros saulėgrįžos dieną*** (Saulė pasuka atgal dangaus pusiaujo link) šiauriniame Žemės pusrutulyje prasideda astronominė vasara, o pietiniame – astronominė žiema.

Rugsėjo 23 d. (arba 22 d.) Saulė vėl kerta dangaus pusiaują, tiktai ši kartą rudens lygiadienio taške ($\alpha = 12^h$, $\delta = 0°$). Pasikartoja kovo 21 d. situacija, tik dabar šiauriniame Žemės pusrutulyje prasideda astronominis ruduo, o pietiniame – astronominis pavasaris. ***Rudens lygiadienį*** Šiaurės ašigalyje baigiasi pusę metų trukusi poliarinė diena, o Pietų – tiek pat trukusi poliarinė naktis.

Saulei persiritus į pietinį dangų ($\delta_{\odot} < 0$), Žemės pusrutuliai pasikeičia vaidmenimis, tai, kas anksčiau vyko viename pusrutulyje, dabar simetriškai vyksta kitame. Į ekliptikos žiemos saulėgrįžos tašką ($\alpha = 18^h$, $\delta = -23°26'$) Saulė ateina gruodžio 22 d. (kartais 21 d.). Tą dieną Saulė kulminuoja zenite geografinėje platumoje $\varphi = -23°26'$, visai nenusileidžia platumose $\varphi \leq -66°34'$ ir nepateka platumose $\varphi > +66°34'$. Mūsų platumose ***žiemos saulėgrįžos dieną*** Saulės kelias virš horizonto yra pats trumpiausias ir žemiausias (vidurdienį $h_{\odot} = 90° - \varphi - 23°26'$). Šią dieną šiauriniame Žemės pusrutulyje prasideda astronominė žiema, o pietiniame – astronominė vasara.

Ypatinga savo padėtimi (astronomine prasme) išsiskiria keturios Žemės rutulio geografinės lygiagretės. Jos turi savo pavadinimus. Tai ***šiaurės*** ($\varphi = +23°26'$) ir ***pietų*** ($\varphi = -23°26'$) ***atogrąžos (tropikai)*** bei ***šiaurės*** ($\varphi = +66°34'$) ir ***pietų*** ($\varphi = -66°34'$) ***poliaračiai***. Tiktai atogrąžose ir tarp jų Saulė vidurdienį gali būti zenite (atogrąžose vieną kartą per metus, visose kitose vietose du kartus). Poliaračiai atskiria sritis, kuriose jau būna poliarinės dienos ir poliarinės naktys (kuo arčiau ašigalių, tuo ilgesnės poliarinės dienos ir naktys). Žemės paviršiaus juostose tarp atogrąžų ir poliaračių Saulė kasdien pateka ir nusileidžia ir niekada nebūna zenite.

Iki šiol Saulę laikėme tašku, o iš tikrųjų tai – skritulys, kurio vidutinis regimasis spindulys lygus 16'. Liko nuošalyje taip pat astronominės refrakcijos reiškinys, dėl kurio Saulė prie horizonto matoma maždaug 35' aukščiau negu iš tikrųjų yra (žr. 1.7). Saulės patekėjimu ar nusileidimu praktiškai laikomi momentai, kada matematinį horizontą kerta jos skritulio viršutinis kraštas. Taigi Saulės skritulio centras, jai patekant ir nusileidžiant, dar yra 51' po horizontu. Vadinasi, iš tikrųjų Saulė pateka anksčiau ir nusileidžia vėliau negu tai būtų, jei neatsižvelgtume į jos spindulį ir refrakcijos įtaką, taigi diena iš nakties atima mažų mažiausiai kelias minutes. Žemės pusiaujyje diena visada ilgesnė (maždaug 7 min.) už naktį, nors teoriškai ten visada diena lygi nakčiai. Mūsų platumose diena susilygina su naktimi dar prieš pavasario lygiadienio dieną (kovo 21 d.), o naktis pasiveja dieną jau po rudens lygiadienio dienos (rugsėjo 23 d.). Toje pat platumoje poliarinė diena pralenkia poliarinę naktį mažių mažiausiai keliomis paromis, o poliaračiuose apskritai nebūna poliarinės nakties (ji prasideda nuo $\varphi = \pm 67°25'$, o poliarinės dienos jau nuo $\varphi = \pm 65°43'$).

1.9. ASTRONOMINIS LAIKO MATAVIMAS

Laiko matavimui reikia pasirinkti periodinius procesus. Tam gerai tinka Žemės sukimasis apie savo ašį. Gana dideliu tikslumu galima laikyti, kad Žemė sukasi tolygiai, be to, su Žemės sukimusi yra susieta žmonėms įprasta dienos ir nakties kaita. Apie Žemės sukimąsi sprendžiama iš dangaus sferos regimojo sukimosi. Tada tolygiai kintantis kurio nors paimto orientyru dan-

gaus sferos šviesulio ar taško valandinis kampas apibūdina laiką, praėjusį nuo to orientyro viršutinės kulminacijos, o laiko tarpą tarp dviejų gretimų to paties tipo jo kulminacijų (tame pačiame geografiniame dienovidinyje) galima laikyti laiko matavimo vienetu. Toks laiko matavimo vienetas, susietas su Žemės apsisukimu apie ašį, vadinamas ***para***. Para gali nebūti tiksliai lygi Žemės apsisukimo periodui: jos trukmė dar priklauso nuo to, ar pasirinktasis orientyras yra nejudamai susietas su dangaus sfera, ar ne. Praktiškai laikas matuojamas pagal pavasario lygiadienio tašką ir pagal Saulę. Atitinkamai kalbama apie ***žvaigždinį*** ir ***saulinį laikus***. Aišku, **laikas, kaip materijos egzistavimo forma, tėra vienas, o įvairūs jo pavadinimai atspindi tiktai skirtingus laiko matavimo būdus.**

Ilgesniems laiko tarpams matuoti naudojamas kitas gamtos padiktuotas vienetas – ***metai***. Šis laiko matavimo vienetas yra susietas su Saulės judėjimu ekliptika, t. y. su Žemės skriejimu aplink Saulę. Laiko tarpas, per kurį Saulė vėl grįžta į tą pačią dangaus sferos vietą, t. y. prie tos pačios žvaigždės, vadinamas ***žvaigždiniais***, arba ***sideriniais*** (lot. *sidus* – žvaigždė), metais. Šių metų trukmė – 365,2564 vidutinės saulinės paros (žr. **1.12**) – lygi Žemės apskriejimo aplink Saulę periodui. Laiko tarpas tarp dviejų gretimų Saulės perėjimų per pavasario lygiadienio tašką vadinamas ***atogrąžiniais***, arba ***tropiniais***, metais. Kadangi pavasario lygiadienio taškas dėl precesijos (žr. **2.18**) lėtai slenka ekliptika į vakarus (pasitinka Saulę), tai atogrąžiniai metai yra šiek tiek (20^m24^s) trumpesni už žvaigždinius metus ir trunka 365,2422 vidutinės saulinės paros. Praktiniame gyvenime turi reikšmę tiktai atogrąžiniai metai, nes su jais yra susieta metų laikų kaita.

1.10. ŽVAIGŽDINIS LAIKAS

Žvaigždiniu laiku sutrumpintai vadinama laiko matavimo skalė, kurios pagrindą sudaro ***žvaigždinė para*** – laiko tarpas tarp dviejų gretimų vienavardžių pavasario lygiadienio taško kulminacijų tame pačiame geografiniame dienovidinyje. Kadangi pavasario lygiadienio taškas pamažu slenka ekliptika vakarų kryptimi (žr. **2.18**), tai žvaigždinė para yra truputį ($0^s,0084$) trumpesnė už Žemės apsisukimo apie ašį periodą. Žvaigždinės paros pradžia laikomas pavasario lygiadienio taško viršutinės kulminacijos momentas. Tada ***žvaigždinis laikas s*** bet kuriuo kitu momentu skaitine verte bus lygus pavasario lygiadienio taško valandiniam kampui t_Υ, išreikštam laiko vienetais, t. y.

$$s = t_\Upsilon . \quad (1.8)$$

Praktiškai pasinaudoti šia formule neįmanoma, nes pavasario lygiadienio taškas dangaus sferoje niekaip nepažymėtas. Žvaigždiniam laikui nustatyti reikia išmatuoti konkretaus šviesulio su tiksliai žinoma rektascensija α valandinį kampą t, nes pagal **1.4** pav.

$$s = t_{\gamma} = \alpha + t. \qquad (1.9)$$

Dar geriau stebėti šviesulį viršutinėje kulminacijoje, tada jo $t = 0$ ir

$$s = \alpha. \qquad (1.10)$$

Taigi **žvaigždinis laikas skaitine verte lygus šviesulio, kuris tuo momentu yra viršutinėje kulminacijoje, rektascensijai.**

Pavasario lygiadienio taško ir Saulės tarpusavio padėtis nepaliaujamai kinta, todėl žvaigždinės paros pradžia sutampa vis su kitu dienos ar nakties momentu. Pavyzdžiui, rugsėjo antrojoje pusėje žvaigždinė para prasideda maždaug vidurnaktį, o po pusės metų jau vidurdienį. Aišku, naudotis žvaigždiniu laiku kasdieniniame gyvenime, kurio ritmą sąlygoja Saulė, būtų labai nepatogu. Tačiau be jo sunku apsieiti astronomijoje, geodezijoje bei navigacijoje, o šiaip laikui matuoti geriau tinka Saulė.

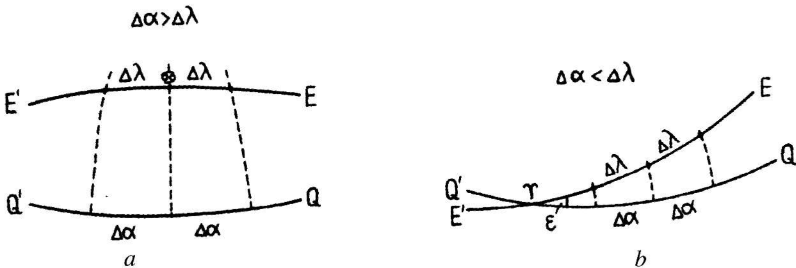
1.11. TIKRASIS SAULINIS LAIKAS

Laiko tarpas tarp dviejų gretimų vienavardžių Saulės skritulio centro kulminacijų tame pačiame geografiniame dienovidinyje vadinamas ***tikrąja sauline para***. Jos pradžia laikomas Saulės skritulio centro apatinės kulminacijos momentas (***tikrasis vidurnaktis***). Tada ***tikrasis saulinis laikas*** $T_{\odot}$ bet kuriuo kitu momentu skaitine verte bus lygus Saulės skritulio centro valandiniam kampui $t_{\odot}$, išreikštam laiko vienetais, plius 12^{h}, t. y.

$$T_{\odot} = t_{\odot} + 12^{h}. \qquad (1.11)$$

Viršutinės Saulės skritulio centro kulminacijos momentu (***tikrąjį vidurdienį***) $t_{\odot} = 0^{h}$ ir $T_{\odot} = 12^{h}$.

Tikrosios saulinės paros trukmė būtų vienoda, jeigu Saulės rektascensija kistų tolygiai (juk valandiniai kampai matuojami dangaus pusiaujo lankais). Tačiau taip nėra dėl dviejų priežasčių: dėl netolygaus Saulės judėjimo ekliptika (arba nevienodo Žemės greičio įvairiose jos elipsinės orbitos vietose) ir dėl ekliptikos posvyrio į dangaus pusiaują. Antrąją priežastį paaiškina **1.8** pav. parodytos lygių Saulės ekliptinės ilgumos pokyčių $\Delta\lambda$ projekcijos į dangaus



1.8 pav. *Lygių ekliptikos EE' atkarpų, esančių prie vasaros saulėgrįžos taško (a) ir prie pavasario lygiadienio taško (b), projekcijų į dangaus pusiaują QQ' palyginimas*

pusiaują, t. y. atitinkami jos rektascensijos pokyčiai $\Delta\alpha$. Matyti, kad šie pokyčiai įvairiu metų laiku yra skirtingi: didžiausi būna saulėgrįžų dienomis (1.8 pav., *a*, – deklinacijos apskritimų tinklas plečiasi artėjant prie dangaus pusiaujo), o mažiausi – lygiadienio dienomis (1.8 pav., *b*). Ilgiausia tikroji saulinė para būna gruodžio 23 d. (Saulė yra arti žiemos saulėgrįžos taško ir, be to, greitai slenka), o trumpiausia – rugsėjo 16 d.; skirtumas tarp jų lygus 51 sekundei.

Dėl netolygaus Saulės skritulio centro valandinio kampo kitimo (tikrosios saulinės paros nepastovumo) tikrasis saulinis laikas netinka praktinei veiklai. Praktiniame gyvenime reikia pastovaus laiko matavimo vieneto, vis dėlto susieto su Saule.

1.12. VIDUTINIS SAULINIS LAIKAS. LAIKO LYGTIS

Visuotinai laiką priimta matuoti pagal vadinamąją ***vidutinę pusiaujinę saulę*** – sutartinį dangaus sferos tašką, kuris tolygiai vidutiniu tikrosios Saulės greičiu juda dangaus pusiauju į rytus ir visą ratą padaro per tą patį laiką, kurį sugaišta Saulė apeidama ekliptiką. Vidutinė pusiaujinė saulė „paleidžiama“ judėti rytų kryptimi iš pavasario lygiadienio taško, kai į jį patenka kitas sutartinis taškas (vidutinė ekliptinė saulė), tolygiai judantis ekliptika vidutiniu tikrosios Saulės greičiu ir sutampantis su ja sausio ir liepos mėnesių pradžioje (kai Saulė juda greičiausiai ir lėčiausiai). Vidutinė pusiaujinė saulė slenka pačiu dangaus pusiauju ir tolygiai, todėl jos rektascensijos pokytis per tam tikrą laiką yra pastovus ir pagal ją galima nustatyti pagrindinį astronominio laiko matavimo vienetą. ***Vidutine sauline para*** (arba tiesiog vidutine para) vadinamas laiko tarpas tarp dviejų gretimų vienavardžių vidutinės pusiaujinės saulės kulminacijos momentų tame pačiame Žemės dienovidinyje. Vidutinė saulinė para yra lygi tikrųjų saulinių parų metiniam vidurkiui. Laiko matavimo skalė, kurios pagrindą sudaro vidutinė saulinė para, vadinama ***vidutiniu sauliniu laiku*** (arba tiesiog vidutiniu laiku).

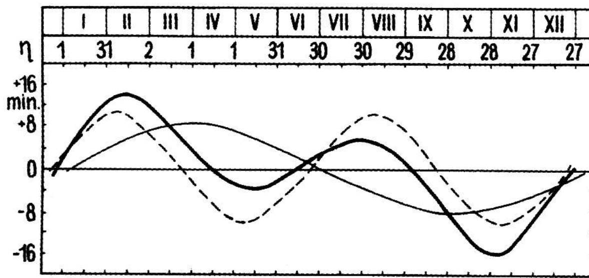
Vidutinės saulinės paros pradžia tam tikrame geografiniame dienovidinyje laikomas apatinės vidutinės pusiaujinės saulės kulminacijos momentas (***vidutinis vidurnaktis***). Tada bet kuriuo kitu momentu vidutinis saulinis laikas T_m skaitine verte bus lygus vidutinės pusiaujinės saulės valandiniam kampui t_m, nustatytam laiko vienetais, plius 12^h, t. y.

$$T_m = t_m + 12^h. \quad (1.12)$$

Vidutinės pusiaujinės saulės viršutinės kulminacijos momentu (***vidutinį vidurdienį***) $t_m = 0^h$, o $T_m = 12^h$.

Kasdieniame gyvenime, nurodant laiką, turimas mintyje vidutinis saulinis laikas, tačiau žodžiai „vidutinis saulinis“ praleidžiami. Vidutinė saulinė para sudaro kalendorinių dienų skaičiavimo pagrindą.

Vidutinė pusiaujinė saulė ir tikroji Saulė juda netoli viena kitos (valandiniai



1.9 pav. *Laiko lygties ir jos dedamųjų grafikai*

kampai skiriasi nedaug), tačiau jų tarpusavio padėtis nuolat kinta: tikroji Saulė tai truputį aplenkia vidutinę pusiaujinę saulę, tai truputį atsilieka nuo jos. Tiesiogiai išmatuoti įsivaizduojamos vidutinės pusiaujinės saulės valandinio kampo negalima – jis nustatomas skaičiavimais, kai yra žinoma tikrosios Saulės valandinis kampas ir vadinamoji ***laiko lygtis*** η. Ja vadinamas to paties momento vidutinio ir tikrojo saulinių laikų skirtumas:

$$\eta = T_m - T_\odot. \qquad (1.13)$$

Pagal (**1.11**), (**1.12**) ir (**1.9**) formules laiko lygtis

$$\eta = t_m - t_\odot = \alpha_\odot - \alpha_m, \qquad (1.14)$$

čia $\alpha_\odot$ – tikrosios Saulės rektascensija, α_m – vidutinės pusiaujinės saulės rektascensija. Laiko lygtis gali būti teigiama ir neigiama, nes, kaip minėta, tikroji Saulė ir vidutinė pusiaujinė saulė lenkia viena kitą. Kai $\eta > 0$, tikroji Saulė yra pasislinkusi į rytus nuo vidutinės pusiaujinės saulės (tikrasis vidurdienis seka po vidutinio vidurdienio), o kai $\eta < 0$, atvirkščiai, tikroji Saulė yra į vakarus nuo vidutinės pusiaujinės saulės (tikrasis vidurdienis įvyksta prieš vidutinį vidurdienį).

Kaip kinta laiko lygtis per metus, matome **1.9** pav. (stora kreivė). Ten pat nubrėžtos dar dvi kreivės (sinusoidės), kurias sudėjus ir gaunamas laiko lygties kitimo grafikas. Plonoji kreivė rodo, kokią įtaką laiko lygčiai turi netolygus Saulės judėjimas ekliptika, o brūkšninė kreivė rodo ekliptikos posvyrio į dangaus pusiaują įtaką. Apie balandžio 15 d., birželio 14 d., rugsėjo 1 d. ir gruodžio 25 d. laiko lygtis būna lygi nuliui. Didžiausią teigiamą reikšmę ($+14^m,3$) ji turi apie vasario 12 d., o didžiausią neigiamą ($-16^m,4$) – apie lapkričio 3 d.

Iš (**1.13**) ir (**1.11**) formulių išplaukia, kad

$$T_m = T_\odot + \eta = t_\odot + 12^h + \eta. \qquad (1.15)$$

Taigi vidutiniam sauliniam laikui nustatyti reikia išmatuoti tikrosios Saulės valandinį kampą $t_\odot$ ir žinoti laiko lygtį η tuo momentu. Laiko lygties reikšmės apskaičiuojamos teoriškai ir tam tikriems momentams skelbiamos astronominiuose kalendoriuose (dažnai laiko lygtimi laikomas skirtumas $T_\odot - T_m$). Stebėti didelį Saulės skritulį nepatogu, todėl vidutinis saulinis laikas dažniausiai nustatomas pagal žvaigždžių stebėjimus (žr. **1.16**).

1.13. ŽEMĖS SUKIMOSI NETOLYGUMAS. ATOMINIS LAIKAS

Neabejotinai nustatyta, jog Žemės sukimosi kampinis greitis kinta. Saulės ir Mėnulio trauka sukelia Žemėje potvynių bangas (žr. **2.17**). Sukantis Žemei tarp šių bangų, atsiranda trinties jėgos, kurios nuolat lėtina Žemės sukimąsi apie savo ašį. Dėl šio efekto para per šimtą metų pailgėja maždaug $0^s,0017$. Taip pat reguliariai kasmet kartojasi Žemės sukimosi greičio kitimai. Greičiausiai Žemė sukasi rugpjūtį, lėčiausiai – kovo mėnesį, paros trukmės svyravimo amplitudė yra apie $0^s,001$. Periodinių kitimų priežastis – sezoninė vandens ir oro masių cirkuliacija. Ta pati priežastis dar sukelia pusės metų periodo tik mažesnės amplitudės svyravimus. Potvyninius reiškinius Žemės paviršiuje lydi mėnesio, pusės mėnesio, paros ir pusės paros periodų Žemės sukimosi greičio kitimai. Modernios tyrimų priemonės atskleidė dar daugiau labai mažos amplitudės ir labai trumpo periodo (mažiau paros) kitimų, susietų, matyt, su procesais Žemės gelmėse ir vandenynuose. Pagaliau registruojami neaiškios kilmės netaisyklingi (gana staigūs) kelių tūkstantųjų sekundės dalių dydžio (iki $\pm 0^s,004$) paros ilgio kitimai.

Taigi ir vidutinė saulinė para nėra pastovus dydis ir negali būti laiko etalonas, kai reikia laiką matuoti dideliu tikslumu. XX amžiaus šeštajame dešimtmetyje buvo sukurti superstabilūs laiko ir dažnio etalonai, paremti kvantiniais šuoliais tarp atomų ir molekulių energijos lygmenų (žr. **1.20.8**). Tuo remiantis atsirado iš esmės nauja nuo astronominių stebėjimų visiškai nepriklausoma laiko matavimo skalė – ***atominis laikas***. 1967 m. buvo įvestas atominio laiko vienetas – ***atominė sekundė***. Ji yra lygi spinduliavimo, atitinkančio kvantinį šuolį tarp cezio ^{133}Cs atomo pagrindinės būsenos hipersmulkiosios struktūros lygmenų, 9 192 631 770 periodų trukmei. Atominė sekundė tapo laiko vienetu ir Tarptautinėje (SI) vienetų sistemoje. Tarptautinis laiko biuras lygina geriausius įvairių šalių laiko ir dažnio etalonus ir formuoja ***Tarptautinio atominio laiko TAI*** (*International Atomic Time*) skalę.

1.14. LAIKO SKAIČIAVIMO SISTEMOS

1.14.1. Vietinis laikas

Dangaus dienovidinio plokštuma sutampa su geografinio dienovidinio, einančio per stebėtojo vietą, plokštuma: visiems stebėtojams, esantiems tame pačiame Žemės dienovidinyje, dangaus dienovidinis yra bendras, pavasario lygiadienio taškas kulminuoja tuo pačiu momentu, kartu ateina vidutinis vidurnaktis ir pan. Stebėtojai, esantys skirtinguose dienovidiniuose, šito negali pasakyti: kai viename dienovidinyje, pavyzdžiui, yra vidurnaktis, kituose, esančiuose į rytus nuo jo, vidurnaktis bus jau praėjęs, o esančiuose į vakarus –

dar neatėjęs. Vadinasi, kiekviename dienovidinyje yra sava paros (saulinės ar žvaigždinės) pradžia, savas laikas. Šį laiką logiška vadinti ***vietiniu laiku***.

Nesunku įsitikinti, kad dviejų taškų, esančių skirtinguose dienovidiniuose, vietinių laikų (tiek žvaigždinių, tiek saulinių) skirtumas tuo pačiu fizikiniu momentu skaitmenine verte lygus šių taškų geografinių ilgumų skirtumui, išreikštam laiko vienetais, t. y.

$$\left.\begin{matrix} s_2 - s_1 \\ T_{\odot 2} - T_{\odot 1} \\ T_{m2} - T_{m1} \end{matrix}\right\} = \lambda_2 - \lambda_1 \qquad (1.16)$$

Nustatant laiką astronominiu būdu, visada sužinomas vietinis laikas.

1.14.2. Pasaulinis laikas

Grinvičo (nulinio) dienovidinio vietinis vidutinis saulinis laikas vadinamas ***pasauliniu laiku*** ir žymimas ***UT*** (*Universal Time*). Pasauliniu laiku nurodomi daugelio astronominių reiškinių, aprašomų astronominiuose kalendoriuose, momentai. Kai yra nurodytas pasaulinis laikas *UT*, nesunku rasti to momento vietinį vidutinį saulinį laiką T_m bet kurioje Žemės geografinėje ilgumoje λ. Pagal (**1.16**) formulę, kai $\lambda_1 = 0^h$ ir $T_{m1} = UT$, $T_{m2} - UT = \lambda_2$, arba bendru atveju

$$T_m = UT + \lambda. \qquad (1.17)$$

Pasaulinis laikas *UT*, atstovaujantis vidutiniam sauliniam laikui, atspindi visus Žemės sukimosi netolygumus. Todėl netolygus pasaulinis laikas *UT*, aišku, negali sutapti su tolygiu Tarptautiniu atominiu laiku *TAI*. Mūsų laikais vidutinė saulinė para vidutiniškai ilgėja (Žemės sukimasis lėtėja), todėl *TAI* laikas vis labiau paskuba *UT* (astronominio) laiko atžvilgiu. Priimta, kad *TAI* ir *UT* skalės sutapo 1958 m. sausio 1 d. $00^h00^m00^s$.

1.14.3. Pasaulinis koordinuotasis laikas

Atominio laiko tikslumas ir astronominio laiko praktiškumas suderinamas nustatant vadinamąjį ***pasaulinį koordinuotąjį laiką UTC*** (*Coordinated Universal Time*). Tai laiko matavimo sistema, kurios pagrindą sudaro atominė sekundė, tačiau skaičiuojant sekundes jau atsižvelgiama į pasaulinį laiką *UT*. Žiūrima, kad skirtumas *UT* – *UTC* nepasidarytų didesnis kaip ±0,9 s, todėl retsykiais reikia pakoreguoti laikrodžius, rodančius *UTC* laiką. *UTC* skalė koreguojama šuoliais pridedant arba atimant vieną sekundę. Paprastai *UTC* laikas lenkia *UT* laiką ir, norint jį „sustabdyti“, užskubėta sekundė įterpiama tarp gruodžio

31 d. ir (arba) birželio 30 d. paskutinės sekundės ir kito mėnesio pirmos dienos nulinės sekundės (tada tų dienų paskutinė minutė *UTC* sistemoje turi 61 s). Jeigu *UTC* laikas atsiliktų nuo *UT* laiko, minėtų dienų pabaigoje *UTC* sekundžių numeracijoje viena sekundė būtų peršokama. Skirtumas *TAI* – *UTC* visada lygus sveikajam sekundžių skaičiui. Šis skirtumas, pavyzdžiui, 2000 m. buvo +33 s.

UTC skale paremti tikslaus laiko signalai, kuriuos per radiją skelbia specializuotos laboratorijos – laiko tarnybos. Didesnio tikslumo (iki 10^{-4} s) laiko signalus, skirtus mokslo tikslams, ištisą parą siunčia specialios pasaulio radijo stotys. Šiuose signaluose dar yra užkoduojama informacija apie numatomą tuo momentu skirtumą tarp pasaulinio laiko *UT* ir pasaulinio koordinuotojo laiko *UTC*. Taigi dabar ir kasdieniame gyvenime naudojamas laikas iš esmės yra atominis laikas, tačiau taip pakoreguotas, kad maždaug vienos sekundės tikslumu sutaptų su pasauliniu laiku *UT*. Vadinasi, vidutinis saulinis laikas, nustatomas astronominiais stebėjimais, ir toliau lieka civilinio laiko pagrindu.

1.14.4. Juostinis laikas

Kiekviena vietovė, jeigu tik nėra viename geografiniame dienovidinyje, turi skirtingą vietinį laiką. Štai, pavyzdžiui, vakarinių ir rytinių Lietuvos pakraščių vietiniai laikai skiriasi apie 23^m. Aišku, jeigu kiekvienas rajonas gyventų savo vietiniu laiku, bendrauti žmonėms, tvarkyti ūkį būtų nepaprastai sunku. Naudotis visoje Žemėje vienodu laiku taip pat nepatogu: dideli nukrypimai nuo vietinio laiko vėl sukeltų daug problemų. Tada, pavyzdžiui, vidurdienis įvairiuose dienovidiniuose būtų skirtingą valandą (nuo 0^h iki 24^h).

Iki XIX a. pabaigos buvo naudojamasi vietiniais laikais. 1884 m. Vašingtono tarptautinė konferencija pasiūlė pereiti prie juostinio laiko skaičiavimo būdo, kuris veikiai paplito po daugelį šalių. ***Juostinis laikas ZT*** (*Zone Time*) apsaugo nuo palyginti artimų vietovių vietinių laikų gausumo ir kartu neleidžia per daug nutolti nuo vietinio laiko.

Juostinis laiko skaičiavimo būdas pagrįstas sutartiniu Žemės rutulio paviršiaus padalijimu į 24 ***valandines juostas***. Centriniai valandinių juostų dienovidiniai yra nutolę vienas nuo kito tiksliai 15°, arba 1^h, o juostų ribos išilgai dienovidinių eina tik negyvenamose vietose (vandenynuose, jūrose, dykumose), kitur jos vedamos palei valstybių ar administracinių sričių sienas, dideles upes, kalnagūbrius. Valandinių juostų centrinių dienovidinių geografinės ilgumos atitinka sveikąjį valandų skaičių, o ta juosta, kurios centru eina Grinvičo dienovidinis, laikoma ***pagrindine*** (***nuline***).

Priimta, jog visoje tam tikros valandinės juostos teritorijoje laikas yra vienodas ir lygus pasaulinio koordinuotojo laiko *UTC* ir juostinės pataisos, priklausančios nuo juostos padėties, sumai, t. y.

$$ZT = UTC + n^h, \qquad (1.18)$$

čia n – valandinės juostos eilės numeris, skaičiuojant jas nuo nulinės juostos ($n = 0$) rytų kryptimi. Taigi nulinės valandinės juostos juostinis laikas (vakarų Europos laikas) atitinka pasaulinį koordinuotąjį laiką *UTC*. Prie šio laiko pridėjus 1^h, gaunamas pirmosios valandinės juostos juostinis laikas (vidurio Europos laikas), pridėjus 2^h – antrosios juostos laikas (rytų Europos laikas) ir t. t. Lietuva gyvena pagal rytų Europos laiką, nes geometriškai didžioji jos teritorijos dalis, išskyrus vakarinį pakraštį (kur geografinė ilguma $\lambda < 1^h30^m$), priklauso antrajai juostai.

Galima sakyti, jog Žemės rytų pusrutulyje juostinis laikas lenkia *UTC* laiką n valandomis, o vakarų pusrutulyje atsilieka $24 - n$ valandomis. Štai, pavyzdžiui, JAV rytų pakrantėje juostinis laikas (*Eastern Standard*) atsilieka nuo *UTC* 5 val., o vakarų pakrantėje (*Pacific Standard*) jau 8 val. (Rytų Europos laiko atžvilgiu atitinkamai 7 ir 10 val.).

Viso pasaulio laikrodžių minutinės (ir sekundinės) rodyklės tam tikru momentu rodo tą patį, skiriasi tik valandinių rodyklių padėtis.

1.14.5. Datos keitimosi linija

Dvyliktą valandinę juostą dalija ***datos keitimosi linija***. Ji eina ištisai vandenimis maždaug 180° geografinės ilgumos dienovidiniu. Nuo šio dienovidinio nukrypstama, kai reikia pasukti į Beringo sąsiaurį ir aplenkti apgyvendintus Ramiojo vandenyno salynus.

Abipus datos keitimosi linijos data skiriasi viena para: į rytus nuo jos data yra ankstesnė (senesnė) negu į vakarus. Pavyzdžiui, kai Čiukčių pusiasalyje sausio 1 d., tai Aliaskoje (už Beringo sąsiaurio) dar tik gruodžio 31 d. Nauja data, atėjusi į Žemę datos keitimosi linija, toliau palaipsniui plinta į vakarus.

Datos keitimosi linija padeda išvengti klaidų skaičiuojant dienas kelionėse aplink pasaulį. Jeigu pasaulis apkeliaujamas rytų kryptimi (Žemės sukimosi kryptimi), tai padaromas papildomas apsisukimas apie Žemės ašį ir keliautojas norėdamas prisitaikyti prie vietinio laiko, turi vis pasukti laikrodžio rodykles pirmyn. Šitaip jis aplenks laiko skaičiavime pasilikusius vietoje viena para. Apkeliavus pasaulį vakarų kryptimi, tarsi anuliuojamas vienas Žemės apsisukimas, ir keliautojas, vis pavarydamas laikrodžio rodykles atgal, praras vieną parą palyginti su išvykimo vietos data. Taip neatsitiks, jeigu keliautojas nepamirš datos keitimosi linijos.

Kada laivas plaukia iš vakarų į rytus ir kerta datos keitimosi liniją, datą reikia keisti į ankstesnę (vakarykštę), o kai plaukia į vakarus – į vėlesnę (rytdienos). Praktiškai, perkirtus šią liniją, data nekeičiama iki ateinančio vidurnakčio, o po to paliekama ta pati (ta pati data tęsiasi dvi paras), jei plaukiama į rytus, ir praleidžiama viena data, jei plaukiama į vakarus (pavyzdžiui, po kovo 1 d. eina kovo 3 d.).

1.14.6. Vasaros laikas

Kai kuriose šalyse vasarą laikrodžiai pavaromi 1^h į priekį juostinio laiko atžvilgiu. Įvedus vasaros laiką, geriau išnaudojamas šviesus paros metas – taupoma elektros energija. Paprastai vasaros laikas įvedamas paskutinijį kovo sekmadienį, o atšaukiamas paskutinįjį spalio sekmadienį.

1.14.7. Žemiškasis laikas

XIX a. buvo atkreiptas dėmesys į tai, kad tiksliai išmatuotos regimosios Mėnulio padėtys dangaus sferoje nesutampa su apskaičiuotomis (efemeridinėmis) padėtimis. Būtent šie nesutapimai, kurių negalima buvo paaiškinti traukos jėgų veikimu, jau tada kėlė mintį apie netolygų Žemės sukimąsi apie ašį. Iš tikrųjų, kai vidutinė saulinė para (laiko matavimo vienetas) darosi ilgesnė, atrodo, kad Mėnulis (ir planetos) lenkia apskaičiuotas padėtis. Šiuo požiūriu netolygus laikas, t. y. laikas, kurį sąlygoja Žemės sukimasis, negalėjo tenkinti astronomų. Mėnulio ir planetų judėjimo stebėjimai leido sukurti tolygaus laiko skalę, kuri buvo vadinama ***efemeridiniu laiku***. Viskas supaprastėjo, kai atsirado atominis laikas. Dabar nepriklausomas kintamasis skaičiuojant Saulės sistemos kūnų geocentrines koordinates ateičiai (efemerides) yra vadinamasis ***žemiškasis laikas TT*** (*Terrestrial Time*). Jį su Tarptautiniu atominiu laiku *TAI* sieja tokia lygtis:

$$TT = TAI + 32^s,184. \qquad (1.19)$$

Pastovus šios lygties narys sujungia *TT* skalę su anksčiau naudota tolygaus laiko skale.

Kada paskelbtas efemerides *TT* skalėje norima pervesti į pasaulinį laiką *UT*, reikia turėti skirtumą $TT - UT$. Tiksliai šis skirtumas sužinomas tik dėl praėjusių momentų, kai išnagrinėjami astronominių stebėjimų duomenys, o pateikiamos ekstrapoliuotos jo reikšmės gali iki galo nepasitvirtinti, nes sunku numatyti netaisyklingus Žemės sukimosi pakitimus. 1999 m. sausio 1 d. skirtumas $TT - UT$ buvo $+63{,}47$ s (artimas nuliui jis buvo apie 1900 m.).

1.15. KALENDORIUS

Kalendorius – tai ilgų laiko tarpų skaičiavimo sistema. Laikui skaičiuoti tinka periodiniai gamtos reiškiniai, glaudžiai susiję su praktine žmonijos veikla. Tai dienos ir nakties ***kaita (vidutinė saulinė para)***, metų laikų kaita (***atogrąžiniai metai***) ir pagaliau Mėnulio fazių kaita (***sinodinis mėnuo***: žr. **2.19**). Nebūtų jokio vargo sudarant kalendorių, jeigu atogrąžiniai metai ar sinodinis mėnuo turėtų sveikąjį parų skaičių. Deja, visi trys pagrindiniai astronominio laiko matavimo vienetai yra nebendramačiai: atogrąžiniai metai turi 365,2422, o sinodinis mėnuo – 29,5306 vidutinės saulinės paros (0,0001 paros tikslumu).

Aišku, kalendoriniai metai ar kalendorinis mėnuo turi turėti sveikąjį parų skaičių, kitaip metų ar mėnesių pradžia nesutaps su paros pradžia. Iš čia matyti, kad yra neįmanoma sukurti kalendorių, kuris absoliučiai tiksliai derintųsi su periodiniais gamtos reiškiniais.

Įvairios tautos įvairiais laikais naudojo skirtingus kalendorius, kurie nuolat buvo koreguojami ir tobulinami. Buvo ir yra kalendorių, kurių pagrindą sudaro sinodinis mėnuo, t. y. laiko tarpas tarp dviejų gretimų vienodų Mėnulio fazių. Dabar ***mėnulinis kalendorius*** naudojamas musulmonų kraštuose. Šiame kalendoriuje 12 mėnesių pakaitomis po 30 ir 29 paras sudaro 354 parų trukmės mėnulinius metus. Tikrieji mėnuliniai metai (12 sinodinių mėnesių) turi 354, 3672 paros, todėl kai kurie kalendoriniai mėnuliniai metai yra pailginami viena para, nes antraip kalendorius „išsiderins“ ir pradės neatitikti Mėnulio fazių. Mėnuliniai metai maždaug 11 parų trumpesni už atogrąžinius (saulinius) metus, todėl mėnulinių metų pradžia slenka per visus metų laikus, t. y. gali būti žiemą, rudenį, vasarą bei pavasarį.

Izraelyje ir kai kuriose Tolimųjų Rytų šalyse paplitęs labai sudėtingas ***mėnulinis-saulinis kalendorius***. Šio tipo kalendoriuje bandoma suderinti sinodinį mėnesį ir atogrąžinius metus. Vis dėlto plačiausiai naudojamas (Europa, Amerikos žemynas) yra ***saulinis kalendorius***: jo pagrindą sudaro atogrąžiniai metai.

Šiuolaikinio saulinio kalendoriaus gijos veda į senąją Romą. Ilgą laiką romėnų laiko skaičiavimo sistema buvo labai netobula. Ją iš pagrindų pertvarkyti ryžosi Julijus Cezaris (*G. J. Caesar*). Naujas kalendorius, kuris dabar vadinamas ***Julijaus*** (arba ***senojo stiliaus***) ***kalendoriumi***, įsigalėjo Romoje nuo 46 m. prieš Kristų. Julijaus kalendoriuje treji metai iš eilės turi po 365 paras, o ketvirtieji – 366 paras. Trumpieji metai vadinami ***paprastaisiais***, o pailginti – ***keliamaisiais***. Keliamaisiais laikomi tie metai, kurių skaičius dalus iš 4. Taigi Julijaus kalendoriuje vidutinė kalendorinių metų (Julijaus metų) trukmė yra 365,25 paros. Naujajame kalendoriuje paliktas metų padalijimas į 12 mėnesių, taip pat palikta iš senosios Babilonijos atkeliavusi 7 dienų savaitė. Truputį vėliau dar buvo pakeisti kai kurių mėnesių pavadinimai ir jų dienų skaičius. Šioji Julijaus kalendoriaus struktūra išliko iki mūsų dienų.

Nesudėtingas romėnų kalendorius palaipsniui plito po krikščioniškąsias valstybes. 325 m. Nikėjos susirinkime krikščionių Bažnyčia parėmė Julijaus kalendorių ir patvirtino religinių švenčių datas.

Bėgant šimtmečiams, vis labiau ėmė reikštis Julijaus kalendoriaus netikslumas. Julijaus metai yra ilgesni už atogrąžinius metus – skirtumas 0,0078 paros. Ši kalendoriaus paklaida, bėgant laikui, kaupiasi ir per 128 metus išauga iki paros. Dėl to lygiadienių ir saulėgrįžų dienos kas 128 metai pereina į viena diena ankstesnę datą. Štai Nikėjos susirinkimo metais pavasario lygiadienis sutapo su kovo 21 d., o XVI a. antrojoje pusėje jis atslinko į kovo 11 d. Taigi praėjus dideliam laiko tarpui, paskirtos religinių švenčių (pavyzdžiui,

Velykų) datos pradėjo tolti nuo joms skirto metų laiko. Tatai paskatino peržiūrėti Julijaus kalendorių. Kalendoriaus reforma buvo atlikta 1582 m. nurodžius Romos popiežiui Grigaliui XIII. Kad pavasario lygiadienis grįžtų į kovo 21 d., buvo nutarta einančią po 1582 m. spalio 4 d. dieną vadinti spalio 15 d., o kad ateityje vėl netektų daryti tokių peršokimų, nutarta iš Julijaus kalendoriaus kas 400 metų išmesti po 3 paras (maždaug tokia Julijaus kalendoriaus paklaida susidaro per 400 metų). Siekiant to, buvo priimta toliau nelaikyti keliamaisiais paskutiniųjų šimtmečio metų, jei jie nesidalija iš 400. Taip 1700, 1800, 1900, 2100 ir t. t. metai tapo paprastaisiais, nors Julijaus kalendoriuje visi jie yra keliamieji.

Reformuotas kalendorius dabar vadinamas ***Grigaliaus*** (arba ***naujojo stiliaus***) ***kalendoriumi.*** Skirtumas tarp naujojo ir senojo stilių reformos metais, kaip matėme, buvo 10 parų, 1600 m. jis nepasikeitė, nes abiejuose kalendoriuose šie metai keliamieji: po 1700 m. skirtumas pasidarė 11 parų, po 1800 m. – 12 parų, po 1900 m. – 13 parų, o 14 parų skirtumas bus tik po 2100 m. vasario 28 d.

Ne visos šalys (naudojančios saulinį kalendorių) iškart priėmė naująjį stilių. Vėliausiai Grigaliaus kalendorių įsivedė nekatalikų kraštai. Lietuvos Didžiojoje Kunigaikštystėje jis buvo įvestas 1582 m. Rusijos valdomoje Lietuvos dalyje 1800 m. vėl buvo grįžta prie Julijaus kalendoriaus (Užnemunėje pasiliko Grigaliaus kalendorius). 1915 m. visoje Lietuvoje įsigaliojo Grigaliaus kalendorius. Rusijoje prie naujojo kalendoriaus buvo pereita tik 1918 m.

Pagal naująjį stilių 400 metų intervale yra 303 paprastieji ir 97 keliamieji metai. Taigi Grigaliaus kalendoriuje vidutinių kalendorinių metų trukmė $[(303 \cdot 365 + 97 \cdot 366):400]$ yra 365,2425 paros. Grigaliaus metai yra ilgesni už atogrąžinius metus tiktai 0,0003 paros. Šiuo atveju, skaičiuojant laiką kalendoriniais ir atogrąžiniais metais, nesutapimas, lygus parai, susidaro tik per 3300 metų. Matyti, kad praktiškai nėra reikalo toliau tikslinti vidutinius kalendorinius metus (keisti keliamųjų metų nustatymo taisyklę). Reformos reikia tiktai kalendoriaus „viduje“. Daug nepatogumų sudaro nevienodas mėnesių dienų skaičius, nevienoda metų ketvirčių trukmė.

Kalendoriuje nurodoma ***era***, t. y. momentas, nuo kurio skaičiuojami metai. Erai (kaip ir kalendorinių metų pradžiai) nustatyti kokio nors astronominio pagrindo nėra. Istoriniais laikais metai būdavo skaičiuojami nuo kokių nors realių (miesto įkūrimas, valdovo įžengimas į sostą ir pan.) ir nerealių mitinių („pasaulio sukūrimas“ ir pan.) įvykių. Šiuolaikinio metų skaičiavimo pradžia (mūsų era) siejama su Kristaus gimimu.

Paprasčiausia laiko tarpų skaičiavimo sistema yra ***Julijaus dienos***. Taip vadinamos dienos, kurios nepertraukiama seka (nežiūrint mėnesių, metų ar šimtmečių) numeruojamos nuo 4713 m. sausio 1 d. pr. Kristų. Tai sąlyginė data: ją XVI a. pasiūlė prancūzų mokslininkas Žosefas Skaligeris (*J. J. Scaliger*) (dienų pavadinimu jis įamžino savo tėvo Julijaus atminimą). Laikoma, jog

Julijaus dienos pradžia sutampa su vidutiniu Grinvičo dienovidinio vidurdieniu. Štai, pavyzdžiui, 2000 m. gegužės 6 d. vidutinį Grinvičo vidurdienį prasidėjo nauja – 2451672-oji Julijaus diena. Kiekvienos datos Julijaus diena yra nurodoma astronominiuose kalendoriuose.

Julijaus dienos labai palengvina išreikšti ilgus laiko intervalus tarp kokių nors įvykių vidutinėmis saulinėmis paromis. Tai gerokai supaprastina kai kuriuos astronominius tyrimus (kintamųjų žvaigždžių stebėjimų serijų apdorojimą, kometų judėjimo nagrinėjimą ir t. t.).

1.16. SĄRYŠIS TARP VIDUTINIO SAULINIO IR ŽVAIGŽDINIO LAIKŲ

Atogrąžiniai metai turi 365,2422 vidutinės paros. Kitaip sakant, per atogrąžinius metus Saulė padaro 365,2422 regimojo apsisukimo apie dangaus ašį. Per tą laiką pavasario lygiadienio taškas apsisuka 366,2422 karto, t. y. lygiai vienu kartu daugiau negu Saulė. Taip atsitinka todėl, kad Saulė per metus apsuka vieną ratą kryptimi, priešinga dangaus sferos parinio sukimosi krypčiai. Vadinasi, į 365,2422 vidutines paras telpa 366,2422 žvaigždinės paros. Tada 1 vidutinė para turi k = 1,0027379 žvaigždinės paros, arba 1 žvaigždinė para turi k' = 0,9972696 vidutinės paros.

Dabar galima parašyti formules, kurios leistų pervesti bet kokius vidutinio laiko intervalus (ΔT_m) į žvaigždinio laiko intervalus (Δs) ir atvirkščiai – bet kokius žvaigždinio laiko intervalus – į vidutinio laiko intervalus:

$$\Delta s = k\Delta T_m, \qquad \Delta T_m = k'\Delta s. \qquad (1.20)$$

Jeigu $\Delta T_m = 24^h$, tai $\Delta s = 24^h03^m56^s{,}555$, jeigu $\Delta s = 24^h$, tai $\Delta T_m = 23^h56^m04^s{,}091$. Matyti, jog žvaigždinė para yra trumpesnė už vidutinę parą $3^m56^s{,}555$ žvaigždinio laiko arba $3^m55^s{,}909$ vidutinio laiko ($0^s{,}001$ tikslumu). Žvaigždinis laikas užskuba vidutinio laiko atžvilgiu per parą $3^m56^s{,}555$ ($\sim 4^m$). Praktiškai pervedinėjant laiko intervalus, galima naudotis sudarytomis lentelėmis.

Sąryšiai tarp vidutinio laiko ir žvaigždinio laiko vienetų praverčia, kai reikia kokių nors reiškinių ar įvykių momentus perskaičiuoti iš vieno laiko į kitą. Tarkime, reikia rasti tam tikro momento kurioje nors geografinėje ilgumoje λ žvaigždinį laiką s, kai žinomas to momento vietinis vidutinis laikas T_m. Pagal (**1.17**) formulę surandamas to momento pasaulinis laikas $UT = T_m - \lambda$. Pastarąjį galima suprasti kaip vidutinio laiko intervalą ΔT_m, praėjusį nuo Grinvičo vidutinio vidurnakčio (kai $UT = 0^h$). Šis intervalas pagal lenteles (ar pagal (**1.20**) formulę) paverčiamas į žvaigždinio laiko intervalą Δs. Astronominiuose kalendoriuose nurodomas žvaigždinis laikas S_0, atitinkantis kiekvieną Grinvičo dienovidinio vidutinį vidurnaktį. Taigi pasirinktojo momento žvaigždinis laikas Grinviče $s_0 = S_0 + \Delta s$, o geografinėje ilgumoje λ $s = s_0 + \lambda$ (žr. (**1.16**) formulę).

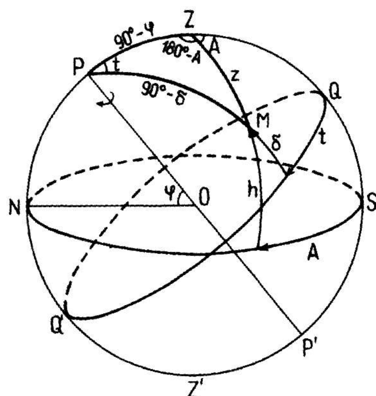
Atvirkščias uždavinys, t. y. perėjimas nuo žinomo žvaigždinio laiko s prie vietinio vidutinio laiko T_m, sprendžiamas tokia tvarka: $s - \lambda = s_0$; $s_0 - S_0 = \Delta s$; $\Delta s \Rightarrow \Delta T_m = UT$; $UT + \lambda = T_m$. Šį uždavinį tenka spręsti, kai tikrinami astronominiai laikrodžiai (nustatoma jų pataisa), rodantys vidutinį laiką, nes astronominiais stebėjimais nustatomas tiktai žvaigždinis laikas (žr. **1.12**).

Apytikriuose skaičiavimuose, kai užtenka kelių minučių tikslumo, laikoma, kad rugsėjo 22 d. vidutinį vidurnaktį bet kuriame Žemės dienovidinyje $S = 0^h$ (maždaug šiuo metu pavasario lygiadienio taškas ir vidutinė pusiaujinė saulė yra diametraliai priešinguose dangaus sferos taškuose, ir žvaigždinis laikas sutampa su vidutiniu sauliniu laiku), o kiekvieną ateinantį vidutinį vidurnaktį žvaigždinis laikas S padidėja maždaug 4^m (gruodžio 22 d. $S = 6^h$, kovo 23 d. $S = 12^h$, birželio 22 d. $S = 18^h$). Tokiu atveju tam tikros dienos vietinio vidutinio saulinio laiko momentu T_m apytikris žvaigždinis laikas $s = S + T_m$, o žvaigždinio laiko momentu s saulinis laikas $T_m = s - S$.

1.17. ASTRONOMINIŲ KOORDINAČIŲ TRANSFORMACIJA

Dangaus dienovidinis, šviesulio deklinacijos apskritimas ir vertikalas susikirsdami sudaro ***sferinį trikampį***, kurio viršūnėse yra šiaurinis dangaus polius P, zenitas Z ir šviesulys M (**1.10** pav.). Šio trikampio forma, sukantis šviesuliui, nuolat kinta, todėl jis buvo pavadintas ***paralaksiniu trikampiu*** (gr. *parallaxis* – nukrypimas). Apskritai sferiniu trikampiu vadinama figūra, kurią sferoje sudaro trys didžiųjų apskritimų lankai. Šie lankai vadinami sferinio trikampio kraštinėmis, o sferiniai kampai ties viršūnėmis – jo kampais. Sferinis kampas matuojamas plokščiuoju kampu, kurį sudaro lankų (kraštinių) liestinės ties kampo viršūne, arba dvisieniu kampu tarp didžiųjų apskritimų, sudarančių sferinį kampą, plokštumų. Savo savybėmis sferinis trikampis skiriasi nuo plokščiojo trikampio, ir jam negalima taikyti plokštumos trigonometrijos formulių. Sferinius trikampius nagrinėja atskira matematikos šaka – ***sferinė trigonometrija***. Ji pateikia daug formulių, kurios apibūdina sąryšius tarp sferinio trikampio kraštinių ir kampų. Čia užrašysime (be įrodymo) tris pagrindines sferinės trigonometrijos formules (teoremas) ir vieną išvestinę, tinkančią stačiajam sferiniam trikampiui:

1. Kosinuso teorema: *sferinio trikampio kraštinės kosinusas yra lygus kitų dviejų jo kraštinių kosinusų sandaugai plius tų pačių kraštinių sinusų ir kampo tarp jų kosinuso sandauga.*



1.10 pav. *Paralaksinis trikampis*

2. Sinuso-kosinuso teorema: *sferinio trikampio kraštinės sinuso ir kampo prie jos kosinuso sandauga yra lygi kitos kraštinės prie to kampo sinuso ir trečios kraštinės kosinuso sandaugai minus kraštinės prie to kampo kosinuso, trečios kraštinės sinuso ir kampo tarp šių kraštinių kosinuso sandauga.*

3. Sinusų teorema: *sferinio trikampio kraštinės ir prieš ją esančio kampo sinusų santykis yra pastovus dydis.*

Stačiojo sferinio trikampio statinio ir prieš jį esančio kampo tangentų santykis yra lygus kito statinio sinusui.

Paralaksinio trikampio kraštinių ir kampų reikšmės pažymėtos **1.10** pav. (čia šviesulys M yra vakarinėje dangaus pusėje, kampas ties juo vadinamas ***paralaksiniu kampu***, ir jis toliau mūsų nedomins). Matyti, kad tarp jų yra tiek horizontinės (z ir A), tiek ir pusiaujinės (δ ir t) šviesulio koordinatės. Remiantis minėtomis pagrindinėmis sferinio trikampio savybėmis, galima užrašyti:

$$\cos(90^\circ-\delta)=\cos(90^\circ-\varphi)\cos z+\sin(90^\circ-\varphi)\sin z\cos(180^\circ-A),$$
$$\sin(90^\circ-\delta)\cos t=\sin(90^\circ-\varphi)\cos z-\cos(90^\circ-\varphi)\sin z\cos(180^\circ-A),$$
$$\sin(90^\circ-\delta)\sin t=\sin z\sin(180^\circ-A),$$

t. y.

$$\left.\begin{aligned}&\sin\delta=\sin\varphi\cos z-\cos\varphi\sin z\cos A,\\&\cos\delta\cos t=\cos\varphi\cos z+\sin\varphi\sin z\cos A,\\&\cos\delta\sin t=\sin z\sin A.\end{aligned}\right\}\qquad(\mathbf{1.21})$$

Pagal šias formules apskaičiuojamos šviesulio pusiaujinės koordinatės δ ir t, kai yra žinomos (arba išmatuotos) tam tikru momentu jo horizontinės koordinatės z ir A. Jeigu dar yra žinomas to momento žvaigždinis laikas s, galima rasti ir rektascensiją α, nes pagal (**1.9**) formulę $\alpha = s - t$.

Analogiškai (**1.21**) formulėms iš paralaksinio trikampio galima išvesti kitą grupę formulių koordinatėms δ ir t (arba α, nes $t = s - \alpha$) pervesti į koordinates z ir A:

$$\left.\begin{aligned}&\cos z=\sin\varphi\sin\delta+\cos\varphi\cos\delta\cos t,\\&\sin z\cos A=-\cos\varphi\sin\delta+\sin\varphi\cos\delta\cos t,\\&\sin z\sin A=\cos\delta\sin t.\end{aligned}\right\}\qquad(\mathbf{1.22})$$

Šios formulės labai reikalingos, kai norima sužinoti šviesulio, kurio koordinatės δ ir α žinomos, stebėjimo sąlygas (padėtį horizonto atžvilgiu) pasirinktu laiko momentu.

Tokiu pat būdu išvedamos formulės šviesulio pusiaujinėms koordinatėms α ir δ transformuoti į ekliptines koordinates λ ir β ir atvirkščiai. Tik tada reikia nagrinėti sferinį trikampį, kurio viršūnės yra prie dangaus poliaus, ekliptikos poliaus ir šviesulio.

1.18. DANGAUS ŠVIESULIŲ PATEKĖJIMO IR NUSILEIDIMO MOMENTAI BEI AZIMUTAI

Šviesulys geografinėje platumoje φ pateka ir nusileidžia, jei jo deklinacijos absoliutinė reikšmė $|\delta| < 90° - \varphi$ (žr. **1.6**). Patekėjimo ir nusileidimo momentais šviesulio valandinį kampą t galima apskaičiuoti pagal pirmąją (**1.22**) formulę, o azimutą A pagal antrąją (arba trečiąją):

$$\cos t = \frac{\cos z - \sin\varphi \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta}, \qquad (1.23)$$

$$\cos A = \frac{\sin\varphi \cos\delta \cos t - \cos\varphi \sin\delta}{\sin z}. \qquad (1.24)$$

Taigi norint turėti duomenų apie dangaus šviesulių patekėjimą ir nusileidimą, be stebėjimo vietos koordinatės φ ir dominančio šviesulio deklinacijos δ, reikia dar žinoti šviesulio tikrąjį zenitinį nuotolį z tais momentais. Dėl kelių priežasčių jis yra nevienodas įvairiems objektams.

Taškinio šviesulio (žvaigždės, apytiksliai ir planetos) patekėjimu ar nusileidimu laikomi momentai, kada jis kerta matematinį horizontą t. y. kada jo regimasis zenitinis nuotolis lygus 90°. Tačiau astronominė refrakcija (žr. **1.7**), kuri prie horizonto yra vidutiniškai 35′, paaukština šviesulį, ir, kai jis matomas horizonte, jo tikrasis zenitinis nuotolis $z = 90° + 35' = 90°35'$.

Pratiso šviesulio (Saulė, Mėnulis) patekėjimu ar nusileidimu vadinami momentai, kai horizontą paliečia ar jį palieka viršutinis šviesulio krašto taškas. Tuo metu šviesulio centras dar (jau) yra po horizontu, o kaip tik jam tinka nurodytos koordinatės. Regimojo Saulės skritulio spindulys vidutiniškai lygus 16′. Vadinasi, tekant arba leidžiantis Saulei, jos disko centro zenitinis nuotolis $z = 90° + 16' + 35' = 90°51'$.

Mėnulio skritulio vidutinis spindulys taip pat lygus 16′, tačiau z šiuo atveju bus kitoks negu Saulės. Dar reikia atsižvelgti į palyginti didelį Mėnulio paralaksinį poslinkį, kai į jį žiūrima iš įvairių Žemės taškų. Mat susitarta šviesulių padėtis (koordinates) dangaus sferoje nurodinėti tokias, kokiose jie būtų matomi iš Žemės centro (tai turi prasmę tiktai Saulės sistemos kūnams). Nuo Žemės paviršiaus stebėtojas mato šviesulį kitoje vietoje (išskyrus zenitą) – truputį žemiau, t. y. didesniame zenitiniame nuotolyje. Prie horizonto šis efektas lygus šviesulio horizontiniam paralaksui (žr. **2.6**). Mėnulio horizontinis paralaksas vidutiniškai lygus 57′. Taigi dėl Mėnulio (**1.23**) ir (**1.24**) formulėse $z = 90° + 16' - 57' + 35' = 89°54'$. Nereikia pamiršti, jog dėl Mėnulio orbitos elipsiškumo jo regimasis spindulys ir horizontinis paralaksas kartais gerokai skiriasi nuo vidutinių verčių. Saulė bei planetos yra daug toliau už Mėnulį, ir į jų mažus horizontinius paralaksus galima neatsižvelgti.

(**1.23**) ir (**1.24**) lygtys duoda po dvi t ir A reikšmes: $t_1 = t$ ir $t_2 = -t$ bei $A_1 = A$ ir $A_2 = -A$. Teigiamos reikšmės atitinka šviesulio nusileidimą, o neigiamos – patekėjimą (t ir A atskaitoma nuo pietų krypties į vakarus).

Jeigu yra žinoma šviesulio rektascensija α, tai apskaičiuota valandinio kampo t reikšmė leidžia nustatyti šviesulio patekėjimo ir nusileidimo vietinį žvaigždinį laiką. Būtent pagal (**1.9**) formulę $s_{pat} = \alpha - t$ ir $s_{nus} = \alpha + t$. Vėliau šį laiką galima perskaičiuoti į vietinį vidutinį saulinį laiką T_m, o po to ir į juostinį laiką (žr. **1.16**). Saulės atveju vietinis vidutinis laikas randamas iš karto, nes pagal (**1.15**) formulę $T_{mpat} = 12^h - t_\odot + \eta$ ir $T_{mnus} = 12^h + t_\odot + \eta$. Laiko lygtis η, kaip ir šviesulių koordinatės, imama iš astronominių kalendorių.

Apskaičiuotų šviesulio patekėjimo ir nusileidimo momentų tikslumas nėra didelis ($>1^m$), nes refrakcija horizonte gali gerokai kisti.

Pagaliau, nesivaikant tikslumo, galima atmesti visus faktorius, keičiančius tikrąjį zenitinį nuotolį šviesulių patekėjimo bei nusileidimo metu ir laikyti $z = 90°$. Tada (**1.23**) ir (**1.24**) formulės yra paprastesnės:

$\cos t = -\mathrm{tg}\varphi\,\mathrm{tg}\delta$, o $\cos A = -\sin\delta/\cos\varphi$ (pagal pirmąją (**1.21**) formulę).

1.19. SUTEMOS. BALTOSIOS NAKTYS

Nusileidus Saulei, tamsa apgaubia vietovę ne staiga, bet pamažu, taip pat pamažu grįžta dienos šviesa prieš patekant Saulei. Tai vakaro ir ryto sutemos. Jų priežastis – šviesos sklaida aukštesniuosiuose Žemės atmosferos sluoksniuose, kuriuos dar apšviečia po stebėtojo horizontu pasislėpusi Saulė. Kol Saulės gylis po horizontu ne didesnis kaip 6° ($h_\odot \geq -6°$), dar (jau) nereikia dirbtinio apšvietimo – tol trunka vadinamosios ***civilinės sutemos***. Vėliau (ankščiau) prasideda ***navigacinės sutemos***, ir jos trunka, kol Saulė yra tarp 6° ir 12° po horizontu. Šiuo laikotarpiu pro jūrų navigacijos prietaisus dar (jau) galima įžiūrėti jūros horizontą, nuo kurio matuojami jau (dar) matomų šviesių navigacinių žvaigždžių aukščiai. Silpniausios žvaigždės pasirodo danguje tik tada, kai Saulė nugrimzta iki 18°. Laikas, per kurį Saulės gylis po horizontu pakinta nuo 12° iki 18° (arba nuo 18° iki 12°), vadinamas ***astronominėmis sutemomis***.

Dažniausiai domina civilinės sutemos. Jų (kaip ir kitų) trukmė Δt priklauso nuo vietovės geografinės platumos φ ir nuo Saulės deklinacijos $\delta_\odot$ (t. y. nuo metų laikų). Jai apskaičiuoti tinka formulė

$$\cos(t + \Delta t) = \frac{\cos z - \sin\varphi \sin\delta_\odot}{\cos\varphi \cos\delta_\odot} \qquad (1.25)$$

čia t – Saulės valandinis kampas jai tekant arba leidžiantis (žr. **1.18**), z – Saulės zenitinis nuotolis civilinių sutemų pabaigoje (pradžioje) lygus 96°. Trumpiau-

sios sutemos yra Žemės pusiaujyje, nes ten Saulė kyla ir leidžiasi statmenai horizontui. Mūsų platumose civilinės sutemos trunka pavasarį ir rudenį maždaug 40^{m}, o vasarą ir žiemą – maždaug 1^{h}.

Jeigu apatinėje kulminacijoje (vidurnaktį) Saulė nenusileidžia po horizontu giliau 6°, tai civilinės sutemos trunka nuo Saulės laidos iki patekėjimo. Tokios šviesios naktys vadinamos ***baltosiomis naktimis***. Vasaros saulėgrįžos dieną ($\delta_{\odot} = +23°26'$) baltosios naktys pasiekia geografinę platumą $\varphi = +60°34'$ (žr. (**1.5**) formulę, kai $h = -6°$), o netinkamos astronominiams stebėjimams naktys – geografinę platumą $\varphi = +48°34'$.

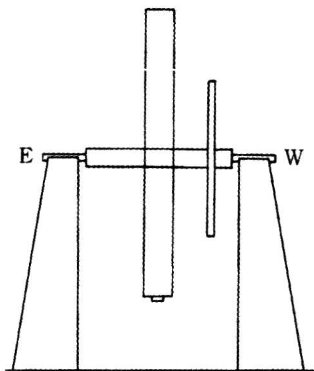
1.20. ŠVIESULIŲ PUSIAUJINIŲ KOORDINAČIŲ NUSTATYMO METODAI

Per visą astronomijos istoriją šviesulių padėčių nustatymo (astrometrijos) metodai ir instrumentai nepaliaujamai tobulėjo, augo matavimų tikslumas. Ypatingą atsinaujinimą astrometrija patyrė po 1970 m. Atsiradus naujoms galimybėms (kompiuteriai, nauji spinduliuotės imtuvai, optiniai bei radiointerferometrai), buvo atsisakyta kai kurių ankstesnių metodų ir prietaisų. Antžeminei astrometrijai atsirado labai rimta konkurentė – kosminė astrometrija. Pastaroji pamažu išstumia dar tebegyvuojančius tradicinius metodus. Nuo šių ir pradėsime trumpą esamų šviesulių koordinačių nustatymo priemonių apžvalgą.

1.20.1. Meridianinis skritulys

Šis prietaisas ilgus amžius buvo pagrindinis astrometrijos prietaisas. Su juo, tik smarkiai modernizuotu, dar dirbama ir šiandien. Instrumento paskirtis – stebėti šviesulius tada, kai jie kerta dangaus dienovidinį (meridianą), t. y. kulminuoja. Per stebėjimą pažymimas to momento laikas ir nustatomas šviesulio zenitinis nuotolis z. Laikas kuo tiksliau perskaičiuojamas į instrumento stovėjimo vietos vietinį žvaigždinį laiką s. Tada sužinoma šviesulio rektascensija α, nes pagal (**1.10**) formulę $\alpha = s$ (apatinės kulminacijos atveju $\alpha = s + 12^{h}$). O pagal (**1.3**) ir (**1.4**) formules šviesulio deklinacija $\delta = \varphi - z$ arba $\delta = \varphi + z$, priklausomai nuo to, kur kulminuoja šviesulys, ar į pietus, ar į šiaurę nuo zenito (apatinės kulminacijos atveju pagal (**1.5**) formulę $\delta = 180° - \varphi - z$). Čia φ – prietaiso vietos geografinė platuma.

Koordinačių nustatymo principas sąlygoja prietaiso konstrukciją. Meridianinį skritulį sudaro teleskopas – refraktorius ir maždaug metro skersmens skritulys su padalomis, statmenai pritvirtinti prie horizontaliosios ašies, kurią laiko tvirtos atramos, o jos galai nukreipti tiksliai į vakarų W ir rytų E taškus (**1.11** pav.). Taigi refraktorius gali judėti tiktai dangaus dienovidinio plokštumoje



1.11 pav. *Meridianinis skritulys (bendras vaizdas iš priekio)*

ir juo galima stebėti tiktai kulminuojančius šviesulius. Refraktoriaus objektyvo skersmuo būna iki 20 cm, o jo židinio nuotolis – iki 3 metrų. Šviesulio perėjimui per dienovidinį fiksuoti objektyvo židinio plokštumoje įrengiamas gana sudėtingos konstrukcijos mikrometras, sujungtas su laikrodžiu. Kažkada stebėtojas akimi sekdavo, kada šviesulys kirs pro okuliarą matomą siūlą, žyminti dangaus dienovidinį. Dabar akį pakeičia fotoelektriniai ar CCD imtuvai (žr. **3.6.3**). Deklinacijai rasti reikalingą šviesulio zenitinį nuotolį kulminacijoje rodo prietaiso skritulys, kuriame padalos pažymėtos kas 2′ ar 4′. Kampams atskaityti įrengti specialūs mikroskopai (jų būna 2 ar 4). Ir čia žmogaus akį keičia minėti šviesos imtuvai. Apskritai šiuolaikiniai meridianiniai skrituliai yra visiškai automatizuoti. Kompiuteris valdo prietaisą, renka informaciją, ateinančią iš mikrometro ir mikroskopų, pateikia rezultatą – šviesulio koordinates.

Rečiau daromi vadinamieji horizontalieji meridianiniai skrituliai. Jų refraktorius yra nejudantis ir paguldytas ant tvirtos horizontalios plokštumos. Šviesulio, priartėjusio prie dangaus dienovidinio, spindulius į teleskopą nukreipia plokščias veidrodis, kuris gali sukiotis apie rytų – vakarų krypties ašį. Kartu su veidrodžiu pasisuka ir deklinacijų skritulys. Tokio tipo instrumentai yra stabilesni, pašalina kai kuriuos matavimo netikslumo šaltinius, tačiau atsiranda naujų.

Su meridianiniais skrituliais atliekami tiek absoliutiniai (nepriklausomi nuo kitų šviesulių matavimų), tiek santykiniai stebėjimai. Pastaruoju atveju reikia šviesulių su jau žinomomis koordinatėmis. Prietaisu išmatuojami tiriamojo ir atraminio šviesulių zenitiniai nuotoliai ir pažymimi jų kulminacijų žvaigždiniai laikai. Aišku, zenitinių nuotolių skirtumas lygus šviesulių deklinacijų skirtumui, o tų laiku skirtumas – rektascensijų skirtumui. Matavimų su meridianiniais skrituliais tikslumas yra apie 0″,04.

1.20.2. Astroliabija

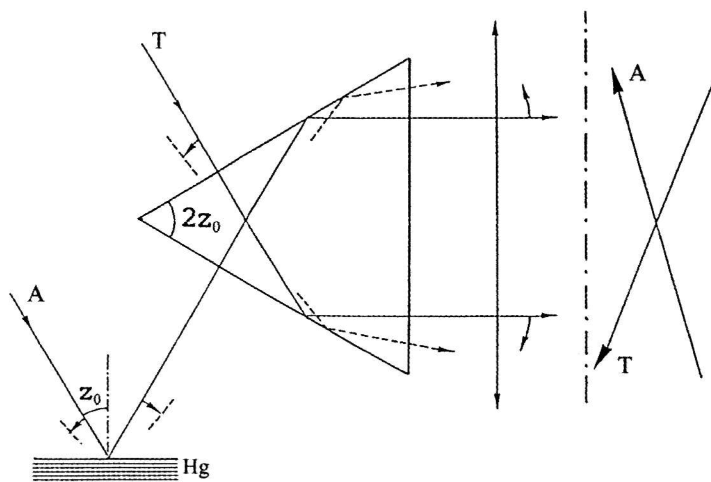
Kitas senas, bet dar kartais tebenaudojamas instrumentas žvaigždžių padėtims nustatyti yra astroliabija (*astron* + gr. *labe* – griebimas). Juo fiksuojami žvaigždžių perėjimai per vienodo aukščio apskritimą – mažąjį dangaus sferos apskritimą, kurio visi taškai turi vienodą zenitinį nuotolį z_0 (žr. **1.5.1**). Tokia prietaiso paskirtis lemia jo konstrukcijos ypatumus. Astroliabija tampa teleskopas, jeigu jo vamzdis yra pritvirtintas prie vertikalios ašies ir gali suktis apie ją, o kampas tarp šios ašies ir teleskopo optinės ašies yra lygus z_0. Tačiau

dažniau daroma kitaip. Priešais horizontaliai ant sukamo stalo paguldyto teleskopo pastatoma optinė sistema, kuri sukuria du tos pačios žvaigždės atvaizdus. Padaroma taip, jog šie atvaizdai, judant žvaigždei (parinis dangaus sferos sukimasis), teleskopo židinio plokštumoje slenka priešingomis kryptimis. Atvaizdai susitinka ir sutampa, kai žvaigždė kerta pasirinktą ir prietaiso įrangoje atspindėtą vienodo aukščio apskritimą ties z_0. Štai tas atvaizdų susiliejimo laikas ir užfiksuojamas specialiomis automatinėmis priemonėmis.

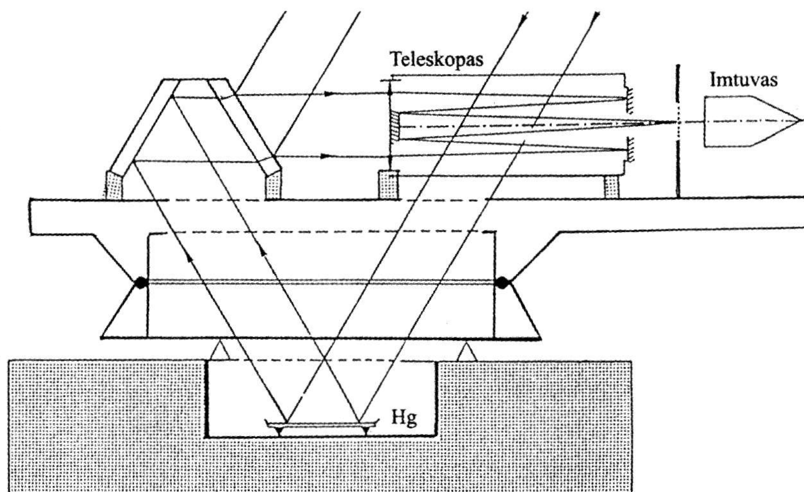
Realizuoti minėtą optinę sistemą galima įvairiai. **1.12** pav. parodyta žvaigždės spindulių eiga prizminėje astroliabijoje. Priešais teleskopo objektyvą stovi stiklinė lygiašonė prizmė, kurios viršūnės kampas lygus $2z_0$ (z_0 paprastai būna 30° ar 45°). Vieną atvaizdą formuoja spinduliai atsispindėję nuo apatinio prizmės šono, kitą – nuo viršutinio, bet prieš tai dar atsispindėję nuo horizontalaus (gyvsidabrio) veidrodžio. Kai žvaigždė yra zenitiniame nuotolyje z_0, atvaizdai sutampa. Punktyrinėmis atkarpomis pavaizduota situacija, kai žvaigždės zenitinis nuotolis padidėja. Matyti, jog atvaizdai išsiskiria ir juda į priešingas puses. Kito tipo astroliabijoje, parodytoje **1.13** pav., vietoje prizmės stovi reikiamu kampu pasviręs veidrodis ir pusiau skaidri plokštelė. Šiame prietaise ir tiesioginiai, ir atsispindėję nuo gyvsidabrio spinduliai aprėpia visą teleskopo objektyvą, o ne pusę, kaip prizminėje astroliabijoje.

Astroliabijos teleskopo skersmuo būna 10–20 cm. Jo optinė sistema parenkama tokia, kad būtų kuo trumpesnis vamzdis. Visas prietaisas tampa kompaktišku ir stabiliu. Tai didelis jo privalumas. Trūkumu reikia laikyti tai, jog, kaip nesunku įsitikinti, prietaisu galima stebėti žvaigždes tik ribotame dangaus plote, būtent tas, kurių deklinacija yra tarp $\varphi - z_0$ ir $\varphi + z_0$.

Taigi stebėjimai su astroliabija parodo laiką, kada žvaigždė būna zenitiniame



1.12 pav. *Dviejų žvaigždės atvaizdų susidarymo prizminėje astroliabijoje principas*



1.13 pav. *Astroliabijos su prizmės pakaitalu bendras vaizdas. Teleskopas ir kitos dalys sumontuotos taip, kad nekliudytų spinduliams pasiekti gyvsidabrio veidrodį*

nuotolyje z_0 (tai atsitinka du kartus per parą). Tačiau šio duomens dar per maža koordinatėms nustatyti. Jos apskaičiuojamos tik po to, kai apibendrinama daugelio žvaigždžių ilgalaikių stebėjimų medžiaga. Pagal rezultatų tikslumą astroliabijos mažai atsilieka nuo meridianinių skritulių.

1.20.3. Fotografinė astrometrija

Daugiau kaip šimtą metų žvaigždėtojo dangaus fotografija buvo vienas iš pagrindinių astrometrijos įrankių. Dabar ji šias pozicijas užleidžia kitiems metodams, bet darbai, nors ir mažesnio masto, dar vykdomi. Dangus fotografuojamas su teleskopais (žr. **3.2**). Pasirenkant teleskopą, svarbu žinoti juo gautų nuotraukų mastelį ir jo regėjimo lauką, t. y. dydį dangaus srities, kurią galima juo nufotografuoti. Mastelis paprastai nurodamas dangaus sferos lanko ilgiu, išreikštu sekundėmis, tenkančiu teleskopo židinio plokštumos (nuotraukos) vienam milimetrui (žr. (**3.2**) formulę). Didesnis mastelis astrometrijoje geriau, bet tada mažėja regėjimo laukas ir, aišku, objektų skaičius nuotraukoje. Kas svarbiau, priklauso nuo stebėjimų tikslo.

Fotografinės astrometrijos poreikiams naudojami kelių tipų teleskopai. Praeityje didelį vaidmenį vaidino vadinamieji ***klasikiniai astrografai***. Tai maždaug 0,4 m skersmens ir 4 m ilgio refraktoriai. Jų regėjimo laukas daugiau kaip 2°, o mastelis apie 50″ į mm. Dabar šie instrumentai paprastai taikomi tik Saulės sistemos kūnų astrometrijoje. Masinei žvaigždžių astrometrijai puikiai tinka ***Šmito teleskopai*** (žr. **3.2.4**). Išskirtinė šios sistemos teleskopų savybė – labai didelis regėjimo laukas, net iki 6°. Kai mastelis yra apie 60″ į mm, visam laukui aprėpti

reikia 36 × 36 cm fotografinės plokštelės. Pasaulyje yra didelio židinio nuotolio (10–15 m) refraktorių ir reflektorių su labai stabilia optine sistema, tinkama astrometriniams darbams. ***Ilgo židinio astrometriniai teleskopai*** teikia didelį mastelį (apie 15″ į mm), bet turi mažą (<1°) regėjimo lauką. Todėl su jais dažniausiai nustatinėjami labai maži žvaigždžių padėties kitimai, sukelti Žemės skriejimo aplink Saulę (paralakso efektas), arba astrometriškai tiriamos dvinarės žvaigždės (žr. **5.30.1**). Kitaip sakant, jie dažniausiai naudojami ten, kur reikia precizinių atskirų objektų stebėjimų.

Nufotografavus dangų, darbai persikelia į laboratoriją. Nuotraukose matuojamos žvaigždžių padėtys tam tikroje stačiakampėje koordinačių sistemoje x, y. Tam sukurti labai sudėtingi ir modernūs aparatai. Iš esmės – tai skenuojantys mikrodensitometrai. Fotografinė plokštelė (negatyvas) slankioja ten ir atgal, o siauras šviesos pluoštelis nustatinėja įvairių jos vietų optinius tankius (žr. (**3.7**) formulę). Su lazerine technika skenuojančio spindulio padėtis plokštelės atžvilgiu įvertinama 0,1 μm tikslumu! Visi duomenys plaukia į kompiuterį, o šis plokštelės optinio tankio kitimuose atpažįsta žvaigždes ir nustato jų koordinates x, y. Naujausiais aparatais taip pat permatuojamos senos nuotraukos, nes anksčiau matavimo aparatai nebuvo tokie tobuli.

Dangaus nuotrauka – tai sferos dalies projekcija į plokštumą. Surastos su koordinačių matavimo prietaisais žvaigždžių padėtys dar yra paveiktos daugelio instrumentinių ir atmosferinių faktorių. Dėl viso to iš karto pereiti nuo x, y koordinačių prie sferinių α ir δ neįmanoma. Būtina, kad nufotografuotame lauke būtų pasibarsčiusių žvaigždžių su jau anksčiau nustatytomis koordinatėmis. Tik tada, remiantis šiomis žvaigždėmis, išvedamos visų kitų žvaigždžių pusiaujinės koordinatės α ir δ. Taigi fotografinėje astrometrijoje galimi tiktai santykiniai matavimai.

Vidinis fotografinių astrometrinių matavimų tikslumas su ilgo židinio teleskopais yra 0″,02, su Šmito teleskopais – 0″,1 ir su astrografais – 0″,2. Tačiau galutiniai rezultatai gali būti prastesni, nes jie priklauso nuo atraminių žvaigždžių padėčių tikslumo. Fotografiškai koordinatės išmatuotos dešimtims milijonų žvaigždžių (daugiausia su Šmito teleskopais).

1.20.4. Astrometrija su CCD

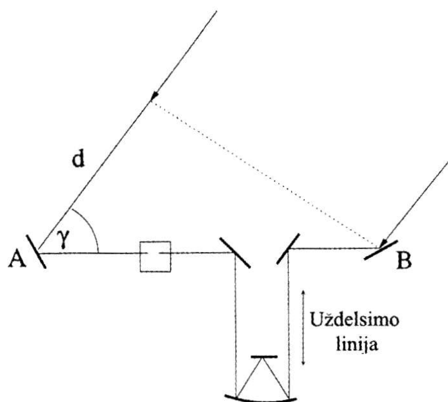
Baigiantis XX a., atsirado naujas modernus dvimatis spinduliuotės imtuvas, trumpai vadinamas CCD (žr. **3.6.3**). Jame sukuriami elektroniniai objektų atvaizdai vietoje cheminių fotografinėje medžiagoje. Daugeliu požiūrių CCD pranoksta fotografiją, ir šiai tenka palaipsniui trauktis. Stebėjimai su CCD patogesni, greitesni, tikslesni. Astrometrijoje labai svarbu, jog nebereikia tarpinės grandies – žvaigždžių padėčių fotografinėje plokštelėje matavimo aparatų. Elektroninė nuotrauka turi tiesioginį ryšį su kompiuteriu, panašiai

kaip plokštelių matavimo aparatas. Panašiais veiksmais abiem atvejais kompiuteris nustato žvaigždžių koordinates.

CCD trūkumas – maži matmenys. Štai dažniausiai naudojamo 2048×2048 elementų CCD dydis, kai elementai yra 15 μm, vos 3×3 cm. Toks imtuvas Šmito teleskopo židinio plokštumoje užkloja tik 0°,5 regėjimo lauko, kuris, kaip matėme, yra 6°. Geresnė situacija yra su ilgo židinio mažo lauko teleskopais. Norint aprėpti didesnį lauką, reikia daryti mozaiką iš kelių CCD. Tačiau atsiranda naujų problemų – reikia derinti įvairių CCD duomenis, o tai ypač sunku, kai maža atraminių žvaigždžių. Dar yra kitas būdas, kaip vienu CCD išmatuoti žvaigždžių koordinates dideliame dangaus plote. CCD savybės leidžia stebėti skenavimo rėžimu. Teleskopas sustabdomas, tada žvaigždžių atvaizdai dėl Žemės sukimosi ima slinkti CCD paviršiumi. Šią eigą nepaliaujamai seka kompiuteris, ir to rezultatas – žvaigždžių koordinatės (jei yra atraminių žvaigždžių) ilgoje juostoje, ištįsusioje palei dangaus lygiagretę. Juostos ilgis priklauso nuo stebėjimo trukmės, o plotis atitinka CCD dydį.

1.20.5. Astrometrija su interferometrais

Interferometrai – tiksliausia antžeminės astrometrijos technika. Daugiausia naudojami Maiklsono žvaigždžių interferometrai. Du teleskopai nukreipiami į tą pačią žvaigždę, ir jų surinkta šviesa pagalbiniais veidrodžiais suvedama į vieną pluoštą, kuris jau krinta į šviesos imtuvą. Interferencinis vaizdas (juostos) pasirodo, jei imtuvą vienu metu pasiekia tas pats bangos frontas (koherentumo sąlyga). Vadinasi, reikia, kad abiejų susieinančių šviesos pluoštelių optiniai keliai būtų vienodi. Tai galima pasiekti arba parenkant imtuvo padėtį, arba įvedant vadinamąją uždelsimo liniją, t. y. veidrodžių sistemą, prailginančią vieno pluoštelio optinį kelią. Antrasis, labiau taikomas, būdas pavaizduotas **1.14** pav. Uždelsimo liniją reikia nuolat koreguoti, nes, kaip matyti, vieno spindulio optinio kelio dalis d priklauso nuo žvaigždės padėties danguje, t. y. nuo kampo γ. Todėl šioje linijoje yra veidrodžių, kurie gali keisti vietą. Uždelsimo linijos ilgis išmatuojamas labai tiksliai, – įrengti lazeriniai interferometrai. Taigi spindulių eigos skirtumo d kitimą, judant žvaigždei, galima išmatuoti labai tiksliai (išlaikant maksimalų interferencinių juostų kontrastą). Žvaigždžių padėčių nustatymo idėja matyti iš **1.14** pav.: $\cos\gamma = d/b$, čia b – inter-



1.14 pav. *Žvaigždžių interferometro principas. Teleskopai prie A ir B neparodyti*

ferometro bazė, t. y. atstumas tarp teleskopų *A* ir *B*, išmatuotas didžiausiu įmanomu tikslumu. Praktiškai žvaigždžių koordinatėms nustatyti reikia jų pasirinkti keletą ar daugiau ir stebėti jas daugelį kartų per naktį. Taip panaikinami kai kurie metodo neapibrėžtumai. Žvaigždžių koordinačių nustatymo tikslumas, pavyzdžiui, su 20 m bazės interferometru, pasiekia 0″,006. Ilgesnė bazė – tikslumas didesnis. Darbas su interferometru yra lėtas, ir tai galima laikyti šio metodo trūkumu. Savo idėja interferometriniai stebėjimai yra absoliutiniai.

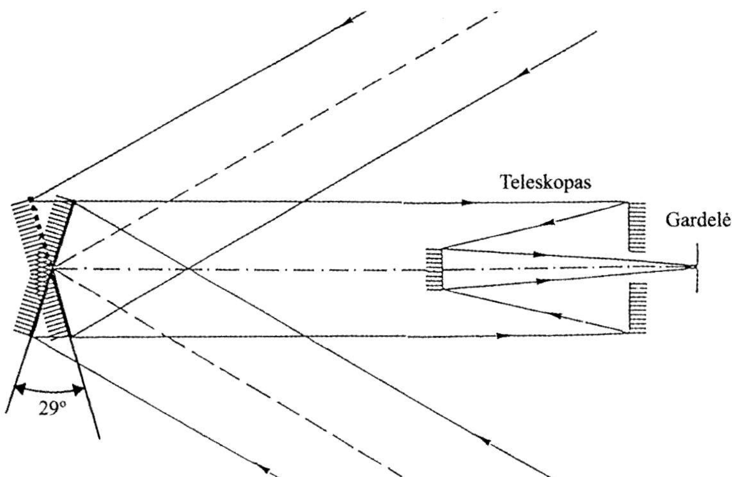
Interferometrais atliekami ir kitos rūšies astrometriniai tyrimai. Artimų šviesos šaltinių interferencinės juostos klojasi, ir matyti deformuotas jų vaizdas. Pagal tai įmanoma įvertinti glaudžios dvinarės žvaigždės komponentų kampinį atstumą bei jų išsidėstymo kryptį. Stebėjimais, atliktais su kintamos bazės interferometru, pavyksta išskirti kai kurių žvaigždžių diskelius, kitais būdais nematomus.

Interferometrai – nepaprastai tobuli ir preciziniai įrenginiai. Ir tai suprantama, – juk čia įtakos turi šviesos bangos ilgio dydžio netikslumai. Pasaulyje veikia keletas optinių interferometrų. Paprastai juos sudaro ne du, bet daugiau teleskopų, tai leidžia keisti bazės ilgį ir orientaciją. Yra interferometrų su 400 m baze! Interferometru, esant reikalui, paverčiami ir įprasti teleskopai, jei jie stovi arti vienas kito (žr. **3.2.9**).

Radijo bangų diapazone yra savi interferometrai (žr.**3.3.3**). Astrometrijoje daugiausia naudojami tik tarpžemininiai (labai ilgos bazės) radiointerferometrai. Stebimi kompaktiški užgalaktiniai radijo šaltiniai (žvaigždės – per silpnos radijo bangų spinduliuotojos). Analizuojant skaitlingus daugelio šaltinių stebėjimus, gaunami unikalūs rezultatai. Radijo šaltinių koordinatės nustatomos dar nepralenktu tikslumu – iki 0″,0001. Kartu nustatoma radioteleskopų, įeinančių į pasaulinį tinklą, padėtis. Tikslumas apie 5 mm! Taigi atsiranda proga Žemės rutulio kontinentų judėjimui tirti. Tarpžemininiais interferometrais sekamas astronominis laikas ir Žemės sukimosi apie ašį netolygumai. Trumpai sakant, tarpžemininė radiointerferometrija tapo pagrindine orientavimosi Žemėje ir danguje priemone.

1.20.6. Kosminė astrometrija

Astrometrinės aparatūros iškėlimas už Žemės atmosferos ribų turi keletą labai svarbių privalumų. Nepaliaujamas atmosferos sluoksnių judėjimas (turbulencija) išplečia šviesulių atvaizdus, kenkia kampinių matavimų tikslumui, mažina pasiekiamų žvaigždžių skaičių. Virš atmosferos to nėra. Atkrenta taip pat sunkiai įvertinama refrakcijos atmosferoje įtaka. Erdvėje nėra problemų, susietų su Žemės sukimusi apie ašį. Ten stebėjimams prieinamas visas dangus. Pagaliau nesvarumo būsenoje daug paprasčiau išlaikyti mechaninį ir optinį aparatų stabilumą. Aišku, orbitose atsiranda kai kurių naujų rūpesčių, vienas



1.15 pav. *HIPPARCOS įrangos principas*

jų – didelė kosminės technikos kaina, tačiau akivaizdu – be jos nebus ir mokslo pažangos. Pirmieji kosminės astrometrijos žingsniai tai patvirtino.

Kosminio Hablo teleskopo (žr. **3.2.9**) mokslinės aparatūros komplekte yra du prietaisai, kurie gali būti naudojami astrometrijos darbams. Žvaigždžių koordinatėms nustatyti tinka kamera, šiaip naudojama dangaus objektų elektroninėms nuotraukoms gauti. Matavimų su ja procedūra primena antžeminę astrometriją su CCD (žr.**1.20.4**). Kitas originalios konstrukcijos su interferencinėmis prizmėmis prietaisas skirtas specialioms siauresnio profilio astrometrinėms užduotims: glaudžioms dvinarėms žvaigždėms ir pasirinktų žvaigždžių paralaksiniams poslinkiams (nuotoliams) matuoti. Išskirtiniai stebėjimų su kosminiu Hablo teleskopu bruožai – silpnos žvaigždės ir didelis tikslumas (padėčių iki 0″,001, paralaksų iki 0″,0005).

Kita orbitinė observatorija buvo paskirta vien tik astrometrijai. Tai – HIPPARCOS (*HIgh Precision PARallax COllecting Satellite*), europiečių sukurtas ir 1989 m. paleistas Žemės palydovas, stebėjęs visą dangų 3,5 metų. Šios astrometrinės observatorijos pagrindinė optinė įranga parodyta **1.15** pav. Priešais 0,29 m skersmens veidrodinį teleskopą stovėjo du tam tikru kampu į priešingas puses pakreipti plokšti veidrodžiai. Jie į teleskopą nukreipdavo dvi dangaus sritis, nutolusias viena nuo kitos maždaug per 58°. Žvaigždžių tarpusavio padėtis matuodavo gerai kalibruota moduliacinė gardelė (periodas 8 μm), įtvirtinta teleskopo židinio plokštumoje. Žvaigždės šviesos moduliaciją sukeldavo lėtas palydovo sukimasis, o ją registravo imtuvai, pastatyti už gardelės. Imtuvų parodymų analizės matematinis aparatas buvo labai sudėtingas, ir čia neįmanoma jo aprašyti.

HIPPARCOC matavo padėtis ir jų mažus kitimus visoms šviesioms žvaigždėms ir daugeliui silpnesnių, atrinktų pagal astronomų pageidavimus. Pa-

skelbtame galutiniame stebėtų žvaigždžių kataloge paminėta per 118 000 objektų. Jame pateikta žvaigždžių koordinatės, paralaksai bei savieji judėjimai per metus (t. y. lėtas žvaigždžių padėčių kitimas dėl realaus jų erdvinio judėjimo). Visų duomenų tikslumas apie 0″,001, t. y. dešimtis kartų pranokstantis daugelio optinių stebėjimų nuo Žemės paviršiaus tikslumą. Daugiau kaip milijono žvaigždžių koordinatės mažesniu tikslumu (vidutiniškai 0″,025) dar buvo išmatuotas su prietaisu, naudotu palydovo padėčiai kontroliuoti.

Netolimoje kosminės astrometrijos perspektyvoje – nauji įstabūs projektai. Jų akiratyje dešimčių ar šimtų milijonų žvaigždžių matavimai, dešimtis kartų viršijantys HIPPARCOS tikslumą! Antžeminiai masiniai astrometriniai tyrimai dar kurį laiką bus reikalingi tik labai silpnoms žvaigždėms stebėti.

1.20.7. Astrometriniai žvaigždžių katalogai

Nustatant galutines šviesulių pusiaujines koordinates, dar reikia atsižvelgti į įvairius faktorius, kurie iškraipo šviesulio padėtį dangaus sferoje. Tai – astronominė refrakcija (žr. **1.7**), parinis ir metinis paralaksai (žr. **2.6** ir **2.9**), aberacija (žr. **2.10**), nutacija (žr. **2.18**). Tiktai po to, kai padarytos atitinkamos pataisos, galima jau naudotis gautomis koordinatėmis ir sustatyti žvaigždžių padėčių sąrašus – ***žvaigždžių katalogus.***

Žvaigždžių katalogams būdinga didelė įvairovė. Priklausomai nuo žvaigždžių padėčių matavimo metodo yra absoliutiniai ir santykiniai katalogai. Absoliutiniai turi nedaug žvaigždžių, o santykiniai – nuo dešimčių tūkstančių iki daugelio milijonų žvaigždžių. Vieni katalogai spausdinami spaustuvėse, kiti laikomi elektroninėje formoje (CD).

Kaip minėta (žr. **1.20.6**), žvaigždžių padėtys daugiau ar mažiau kinta dėl jų savojo judėjimo. Todėl būtinai nurodomas vidutinis katalogo žvaigždžių stebėjimo laikas, vadinamas ***katalogo epocha***. Mažesnės apimties kataloguose kartais stebėjimo data nurodoma kiekvienai konkrečiai žvaigždei. Visų žvaigždžių pusiaujinės koordinatės kinta taip pat dėl precesijos (žr. **2.18**). Precesijos konstantos gerai žinomos, todėl koordinates galima perskaičiuoti bet kuriam kitam laiko momentui. Tas momentas vadinamas ***katalogo lygiadieniu*** arba ***ekvinokcija*** (nes koordinatės priklauso nuo pavasario lygiadienio taško padėties). Priimta žvaigždžių koordinates pateikti suapvalintų metų (pavyzdžiui, 1900, 1950 ir pan.) pradžiai. Naujausių katalogų lygiadieniu pasirinkta 2000–jų metų pradžia.

Lyginant dažniausiai absoliutinius katalogus, buvo sudarinėjami vadinamieji fundamentalieji katalogai, sutrumpintai FK. Jų paskirtis – kuo tiksliau, pagal to meto stebėjimų duomenis, pateikti pasirinktų žvaigždžių koordinates ir savuosius judėjimus. Paskutinis toks katalogas – FK5 – išleistas 1988 m. Į jį įrašytų žvaigždžių (apie 1500) padėčių tikslumas 0″,05. Fundamentalieji

katalogai tapdavo žvaigždžių padėčių atskaitos sistemos pagrindu. Deja, palyginti mažas stebėjimų tikslumas ir nepakankamai tikslus žvaigždžių savojo judėjimo įvertinimas neleisdavo sukurti patikimos ir stabilios atskaitos sistemos. Padėtis pasikeitė, kai astrometriškai imta stebėti užgalaktinius radijo bangų šaltinius. Jų savojo judėjimo praktiškai nėra, be to, jų padėtys, kaip minėta (žr. **1.20.5**), tarpžemininiais radiointerferometrais nustatomos labai tiksliai (iki 0″,0001). Remiantis keliais šimtais kompaktiškų radijo bangų šaltinių, sukurta tarptautinė koordinačių atskaitos sistema, ji suderinta su FK5 sistema dėl 2000,0. HIPPARCOC matuotų žvaigždžių koordinačių sistema susieta su radijo šaltiniais, t. y. ją reikia laikyti optine tarptautinės atskaitos sistemos realizacija.

1.20.8. Chronometrija

Astrometrijoje dažnai reikia tikslaus laiko, t. y. gero laikrodžio. Jame vyksta tam tikros rūšies svyravimai, kurių skaičiavimas ir sudaro laiko matavimo esmę. Kuo svyravimų, kylančių laikrodžio sistemoje, periodas yra pastovesnis, tuo geresnis laikrodis. Ilgą laiką astronomijoje buvo naudojami mechaniniai laikrodžiai su svyruokle. Geriausių astronominių mechaninių laikrodžių parinės eigos svyravimai būdavo ne didesni kaip $\pm 0^s,001$.

Ekspedicijose naudojami mažesnio tikslumo laikrodžiai – ***chronometrai*** (gr. *chronos* – laikas + *metreo* – matuoju). Šių prietaisų mechanizmą varo spyruoklė, o svyruoja balansyras, palaikomas silpnos spyruoklėlės. Nuo įprastų buitinių laikrodžių jie skiriasi kruopščiau padarytomis detalėmis ir specialiu įrėminimu, mažinančiu kilnojimo įtaką mechanizmo eigai. Chronometrų parinės eigos svyravimas maždaug $\pm 0^s,3$.

Mechaniniai laikrodžiai laiko tarnyboms tarnavo iki XX a. vidurio. Vėliau juos pakeitė daug didesnio svyravimų (virpesių) stabilumo sistemos. Vietoje svyruoklės buvo panaudotas kvarcinis rezonatorius. Pagrindinė ***kvarcinio laikrodžio*** dalis – kvarcinis generatorius, t. y. kintamosios elektros srovės generatorius, kurio dažnis stabilizuojamas pjezoelektrinėmis kvarco kristalo plokštelės deformacijomis. Elektroniniai virpesių dažnio dalytuvai pateikia impulsus, kurių trukmę patogu registruoti. Kvarcinių laikrodžių parinė paklaida $\pm 10^{-6}$s. Kaip tik šie laikrodžiai padėjo atskleisti Žemės sukimosi apie ašį netolygumą.

Dar didesnio virpesių dažnio stabilumo leidžia pasiekti sistemos, kuriose naudojami elektromagnetiniai virpesiai, atsirandantys atome (molekulėje) vykstant kvantiniams šuoliams tarp energijos lygmenų. Ypač tikslūs kvantiniai dažnio standartai sukurti remiantis kvantiniais šuoliais cezio ir vandenilio atomuose. Atominių laikrodžių parinės eigos svyravimas $\pm 10^{-9}$s. Atsiradus atominiams laiko standartams, buvo įvesta nauja laiko matavimo sistema – atominis laikas (žr. **1.13**) .

2
SKYRIUS

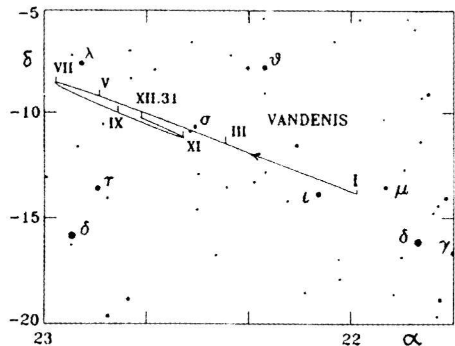
DANGAUS MECHANIKA IR SAULĖS SISTEMOS SANDARA

Aloyzas Pučinskas

2.1. REGIMASIS PLANETŲ JUDĖJIMAS

Praeitame skyriuje buvo aprašytas regimasis metinis Saulės judėjimas, kuris vyksta ekliptika iš vakarų į rytus. Ta pačia kryptimi, tiktai daug greičiau Zodiako žvaigždynais slenka kitas įsidėmėtinas dangaus šviesulys – Mėnulis (žr. **2.19**). Dar gilioje senovėje buvo pastebėta, kad keli žvaigždės pavidalo šviesuliai, esantys netoli ekliptikos, taip pat keliauja iš vieno žvaigždyno į kitą. Klaidžiojančius šviesulius žmonės pavadino ***planetomis*** (gr. *planetes* – klaidžiojanti) ir suteikė joms dievų vardus. Senovėje buvo žinomos penkios planetos: **Merkurijus**, **Venera**, **Marsas**, **Jupiteris** ir **Saturnas** (kitos trys planetos – **Uranas**, **Neptūnas** ir **Plutonas** – buvo atrastos XVIII–XX a.).

Planetų regimasis judėjimas žvaigždžių fone yra sudėtingesnis už Saulės ir Mėnulio regimąjį judėjimą. Didesnę laiko dalį jos, kaip ir Saulė bei Mėnulis, slenka iš vakarų į rytus (**tiesioginis judėjimas**), tačiau, kartais stabtelėdamos, pasuka atgal ir kurį laiką slenka iš rytų į vakarus (**atgalinis judėjimas**), o po to vėl tęsia kelionę rytų kryptimi. Taigi regimajame planetų judėjime galima išskirti laikotarpius, kai dangaus sferoje jos brėžia kilpas arba zigzagus (**2.1** pav.). Tokie laikotarpiai pasikartoja periodiškai, o periodas gali būti nuo 116 dienų (Merkurijus) iki 780 dienų (Marsas). Skirtingos planetos brėžia skirtingo dydžio atgalinio judėjimo lankus (nuo kelių iki keliolikos laipsnių), ir tai trunka nevienodą laiką (nuo keliolikos iki keliolikos dešimčių dienų). Smarkiai skiriasi laikas, per kurį įvairios planetos apeina visą dangų.



2.1 pav. *Saturno kelias danguje 1994 m. Romėniški skaičiai žymi planetos padėtį mėnesio pirmąją dieną*

Planetas aiškiai galime padalyti į dvi grupes, kai imame lyginti jų ***konfigūracijas***, t. y. jų regimąsias padėtis Saulės atžvilgiu. Vieną grupę sudaro Merkurijus ir Venera (***vidinės planetos***), antrą grupę – visos kitos, išskyrus Žemę (***išorinės planetos***).

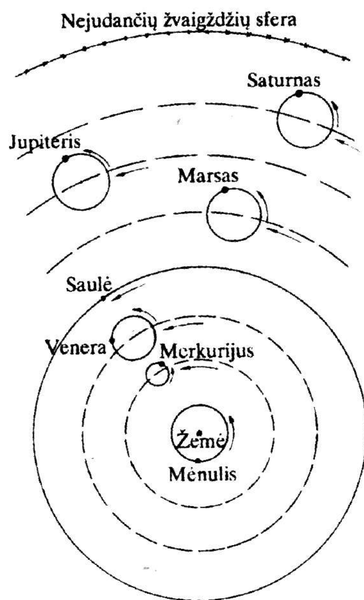
Vidinės planetos niekada smarkiai nenutolsta nuo Saulės ir tarsi svyruoja apie ją. Merkurijus nenutolsta nuo Saulės didesniu kampiniu nuotoliu kaip 28°, o Venera – 48°. Vidinės planetos tiesioginio judėjimo regimasis kampinis greitis kuriuo nors momentu pralenkia Saulės slinkimo greitį (maždaug 1° per parą), ir planeta pasiveja Saulę. Kai susilygina Saulės ir judančios į rytus planetos ekliptinės ilgumos, sakoma, kad planeta yra ***viršutinėje jungtyje*** (***konjunkcijoje***). Netrukus planeta pasirodo į rytus nuo Saulės: ji matoma vakarais vakarų danguje. Regimasis planetos nuotolis nuo Saulės toliau didėja, bet planetos greitis palengva mažėja. Tuo momentu, kai planetos regimasis greitis pasidaro lygus Saulės greičiui, planeta yra didžiausiame nuotolyje nuo Saulės arba, kaip sakoma, planeta yra didžiausioje ***rytų elongacijoje*** (lot. *elongatio* – nuotolis). Nors planeta ir toliau juda į rytus, bet dabar jau greitesnė Saulė vejasi ją. Pagaliau pati planeta pasuka į vakarus Saulės pasitikti. Po kurio laiko vėl susilygina planetos ir Saulės ekliptinės ilgumos. Planetos konfigūracija šiuo momentu vadinama ***apatine jungtimi***. Po apatinės jungties planeta pasirodo Saulės dešinėje ir matoma rytuose ryto aušroje. Netrukus baigiasi planetos atgalinis judėjimas, ir ji pradeda judėti įkandin Saulės, bet, kol greitis dar mažas, planeta tebetolsta nuo Saulės. Tiktai susilyginus greičiams šis procesas nutrūksta – planeta yra didžiausioje ***vakarų elongacijoje***. Po to planetos elongacija mažėja, seka viršutinė jungtis, ir viskas kartojasi iš naujo.

Kitokios yra išorinių planetų konfigūracijos. Šių planetų gali būti bet koks kampinis nuotolis nuo Saulės ir jos atitinkamai gali būti matomos bet kuriuo momentu naktį. Išorinės planetos padėtis, kai jos ekliptinė ilguma yra lygi Saulės ekliptinei ilgumai, vadinama ***jungtimi***. Šiuo metu planeta slenka į rytus, tačiau lėčiau negu Saulė, ir atsilieka nuo jos. Atsilikimas kasdien didėja, ir planeta matoma vis toliau į vakarus nuo Saulės. Kai planetos kampinis nuotolis nuo Saulės yra 90°, sakoma, kad ji pasiekė ***vakarų kvadratūrą***. Tolydžio planetos nuotolis nuo Saulės auga vis sparčiau, nes planetos tiesioginio judėjimo greitis mažėja, ir galop ji pasuka į vakarus. Kai planeta praeina atgalinio judėjimo lanko vidurį, Saulė jau būna priešingoje dangaus pusėje, t. y. tuo momentu planetos ir Saulės ekliptinių ilgumų skirtumas lygus 180°. Ši planetos padėtis vadinama ***opozicija***. Opozicijoje esanti planeta pateka vakare ir matosi visą naktį. Po opozicijos Saulė vejasi planetą iš vakarų pusės, nuotolis tarp jų mažėja, planeta praeina ***rytų kvadratūrą*** (planeta 90° į rytus nuo Saulės) ir po kurio laiko paskęsta Saulės spinduliuose. Seka eilinė jungtis, tačiau jau kitoje dangaus sferos vietoje.

2.2. PTOLEMĖJO PASAULIO SISTEMA

Pirmąkart mėginta moksliškai paaiškinti regimąjį Saulės, Mėnulio ir planetų judėjimą jau senovės Graikijoje. Daugumai to meto mokslininkų atrodė, kad regimasis įspūdis yra tikras, ir visi dangaus šviesuliai turi skrieti apie Žemę. Taigi Žemei buvo priskirta centrinė vieta Visatoje. Vieno kito filosofo teiginiai, kad šiai vietai geriau tiktų Saulė, likdavo mokslo autoritetų šešėlyje. Antikinės astronomijos viršūne tapo garsusis graikų mokslininko Klaudijaus Ptolemėjo (*K. Ptolemaios*) veikalas „Didžioji astronomijos sandara" („Almagestas"), pasirodęs apie 140 m. Šiame dideliame veikale Ptolemėjas išdėstė visą tų laikų astronomiją ir aprašė savąjį ***geocentrinės*** (gr. *ge* – žemė + centras) pasaulio sandaros modelį, kuriam buvo lemta išsilaikyti beveik pusantro tūkstančio metų.

Ptolemėjo pasaulio sistemos centre yra nejudanti kamuolio pavidalo Žemė. Visi kiti dangaus kūnai skrieja apie ją. Arčiausiai Žemės skrieja Mėnulis, toliau – Merkurijus, Venera, Saulė, Marsas, Jupiteris, Saturnas ir pagaliau viską gaubianti, žvaigždžių nusagstyta sfera (2.2. pav.). Tokia tvarka mažėja vidutinis šių šviesulių regimojo judėjimo greitis. (Planetas, esančias žemiau Saulės, imta vadinti apatinėmis, o esančias virš Saulės – viršutinėmis*). Planetos žvaigždžių fone brėžia kilpas, nes jos skrieja apskritimais ***epiciklais***, kurių centrai savo ruožtu juda didesniais apskritimais ***deferentais***. Žemė yra deferentų viduje. Saulė ir Mėnulis skrieja tiesiog deferentais. Šviesulių judėjimas epiciklais, epiciklų centrų judėjimas deferentais vyksta pastoviu greičiu. Įvairių planetų greičiai skirtingi, skiriasi taip pat epiciklų ir deferentų spindulių santykiai bei kampai tarp epiciklų ir deferentų plokštumų. Apatinių planetų epiciklų centrai yra tiesėje, jungiančioje Žemę su Saule (jų apskriejimo deferentu periodas lygus metams). Šiai tiesei visada yra lygiagretūs išorinių planetų epiciklų spinduliai, einantys per pačią planetą (jų apskriejimo epiciklu periodas lygus metams). Parinis šviesulių judėjimas – tai Visatos, kaip visumos, sukimasis apie Žemę.



2.2 pav. *Ptolemėjo geocentrinė pasaulio sistema. Mėnulio, Saulės orbitos ir planetų epiciklai pažymėti ištisinėmis, o planetų deferentai – brūkšninėmis linijomis*

Ptolemėjo pasaulio sistemos geometrinis modelis neblogai paaiškino regimąjį dangaus

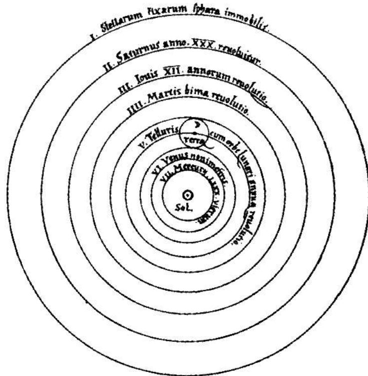
* Šie pavadinimai išliko iki mūsų dienų, nors dabar apatinės planetos dažniau vadinamos vidinėmis (skrieja Žemės orbitos viduje), o viršutinės – išorinėmis.

šviesulių judėjimą. Juo remiantis buvo galima net numatyti būsimas planetų padėtis. Tačiau ilgainiui vis tikslėjant astronominiams stebėjimams, vis labiau ryškėjo skirtumai tarp išmatuotų ir apskaičiuotų pagal Ptolemėjo modelį planetų padėčių. Kad išvengtų tokių nesutapimų, viduramžių astronomai bandė tobulinti Ptolemėjo pasaulio sistemą įvesdami naujus epiciklus. Pavyzdžiui, dviejų epiciklų atveju planeta skrieja antruoju epiciklu, kurio centras juda pirmuoju epiciklu, o jau šio epiciklo centras slenka deferentu. Ptolemėjo pasaulio sistema darėsi vis sudėtingesnė ir sudėtingesnė. Štai, pavyzdžiui, XIII a. Marso regimajam judėjimui paaiškinti reikėjo jau 22 epiciklų! Pagaliau geocentrinis pasaulio modelis pasidarė pernelyg painus, kad juo būtų galima pasinaudoti numatant tikslias planetų padėtis danguje daugeliui metų į priekį. Tačiau tokių duomenų labai reikėjo kartu su Atgimimo epocha prasidėjusioms tolimoms jūrų kelionėms.

2.**3**. KOPERNIKO PASAULIO SISTEMA

Nauja era astronomijoje prasidėjo, kai 1543 m. buvo išleistas įžymiojo lenkų mokslininko Mikalojaus Koperniko (*M. Kopernik*) darbas „Apie dangaus sferų sukimąsi“. Šiame darbe Kopernikas pagrindė ***heliocentrinę*** (gr. *helios* – saulė) pasaulio sistemą ir daug paprasčiau bei natūraliau negu Ptolemėjas paaiškino dangaus šviesulių regimąjį judėjimą (**2.3** pav.).

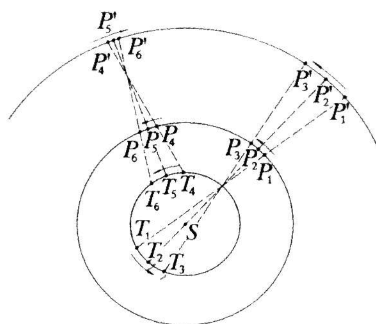
Pagal Koperniką pasaulio centre yra Saulė. Apie Žemę skrieja vienintelis kūnas – jos palydovas Mėnulis. Žemė yra eilinė planeta. Visos planetos skrieja viena kryptimi ir pastoviu greičiu apskritimais. Planetų orbitų plokštumos artimos viena kitai (visada planetos stebimos netoli ekliptikos). Merkurijus ir Venera matomi arti Saulės, nes jų orbitos yra Žemės orbitos viduje. Už Žemės orbitos skrieja Marsas, toliau – Jupiteris ir dar toliau – Saturnas. Nejudamų žvaigždžių sfera yra daug didesnė už Žemės orbitą, nes, Žemei skriejant aplink Saulę, nematyti žvaigždžių paralaksinio poslinkio. Žemė sukasi apie vieną iš savo skersmenų, ir tai sukelia parinio dangaus sferos sukimosi įspūdį.



2.3 pav. *Koperniko heliocentrinė pasaulio sistema*

Žemė skrieja aplink Saulę, o atrodo, jog pati Saulė brėžia žvaigždynų fone savo lygų kelią – ***ekliptiką***. Daug sudėtingesnis brėžinys matyti, kai iš judančios Žemės stebimos kitos taip pat judančios planetos. Tiesioginis ir atgalinis išorinės planetos judėjimas paaiškinamas **2.4** pav., kuriame parodytos Žemės (*T*), išorinės planetos (*P*) padėtys orbitose (*S* – Saulė), taip pat šios planetos regimosios vietos danguje (*P′*) tam tikrais lai-

ko momentais. Išorinės planetos orbitinis linijinis greitis yra mažesnis už Žemės orbitinį greitį. Matyti, kai planeta yra arti jungties ($P_1 - P_3$), ji slenka dangumi iš dešinės į kairę, t. y. tiesiogine kryptimi, o kai yra arti opozicijos ($P_4 - P_6$), tiesioginį judėjimą keičia atgalinis. Panašiai galima paaiškinti, kaip brėžia kilpas vidinės planetos (jos skrieja greičiau negu Žemė).

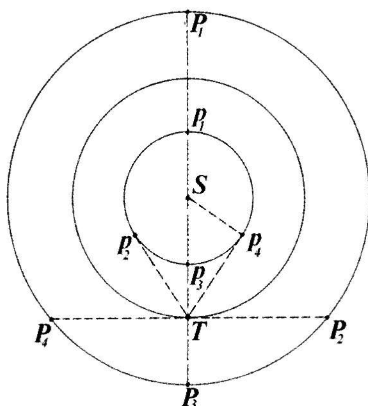


2.4 pav. *Išorinės planetos tiesioginis ir atgalinis judėjimas*

Heliocentrinėje sistemoje pagrindines planetos konfigūracijas, minėtas **2.1** poskyryje, paaiškina erdvinis Žemės, Saulės ir planetos išsidėstymas, parodytas **2.5** pav. Vidinės planetos viršutinė jungtis atitinka orbitos tašką p_1 (planeta toliausiai nuo Žemės); didžiausia rytų elongacija – tašką p_2, apatinė jungtis – tašką p_3 (atstumas nuo Žemės mažiausias) ir didžiausia vakarų elongacija – tašką p_4. Išorinės planetos jungtis atitinka tašką P_1 (atstumas nuo Žemės didžiausias), vakarų kvadratūra – tašką P_2, opozicija – tašką P_3 (atstumas mažiausias) ir rytų kvadratūra – tašką P_4. Koperniko pasaulio sistemoje vidines planetas nuo išorinių skiria Žemės orbita (Ptolemėjo sistemoje – Saulė).

Kopernikas, parinkęs Žemės orbitos spindulį atstumų matavimo vienetu, nustatė planetų santykinius atstumus nuo Saulės ir sudarė Saulės sistemos planą. Kaip tai buvo galima padaryti, pavyzdžiui, vidinių planetų atveju, matyti iš **2.5** pav. Iš stebėjimų randama vidinės planetos didžiausia elongacija (kampas STp_4), o po to iš stačiojo trikampio Tp_4S jau nesunku apskaičiuoti planetos ir Žemės orbitų spindulių santykį (Sp_4:ST).

Kopernikas apskaičiavo taip pat kiekvienos planetos apskriejimo ***žvaigždinį***, arba ***siderinį periodą P***, t. y. laiko tarpą, per kurį planeta padaro visą ratą aplink Saulę (grįžta prie tos pačios žvaigždės). Tam reikėjo žinoti Žemės apskriejimo žvaigždinį periodą – žvaigždinius metus T (žr. **1.9**) ir planetos apskriejimo ***sinodinį*** (gr. *synodos* – jungtis) ***periodą S***, t. y. laiko tarpą, per kurį pasikartoja vienavardė planetos konfigūracija (pavyzdžiui, jungtis). Per parą Žemė orbitoje pasislenka lanku 360°:T, o kita planeta – lanku 360°:P. Jei, sakykim, tai yra išorinė planeta, Žemė aplenkia ją per parą lanku 360°:T – 360°:P. Šis skirtumas kasdien didėja ir, praėjus apskriejimo sinodiniam periodui S, pasidaro lygus 360° (**2.6** pav.), t. y.



2.5 pav. *Pagrindinės planetų konfigūracijos*

$$(360^\circ : T - 360^\circ : P) \cdot S = 360^\circ,$$

arba

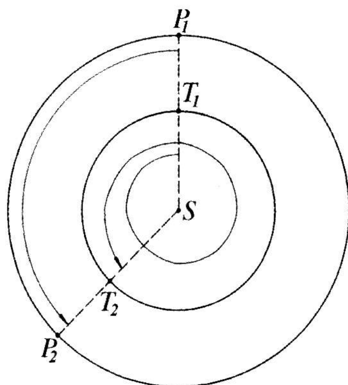
$$\frac{1}{T} - \frac{1}{P} = \frac{1}{S}. \qquad (2.1)$$

Ši formulė vadinama ***išorinės planetos sinodinio judėjimo lygtimi***. Analogiškai išvedama ***vidinės planetos sinodinio judėjimo lygtis*** (vidinė planeta lenkia Žemę):

$$\frac{1}{P} - \frac{1}{T} = \frac{1}{S}. \qquad (2.2)$$

Pagal sinodinio judėjimo lygtis ir buvo apskaičiuoti planetų apskriejimo žvaigždiniai periodai P (periodai T ir S žinomi iš astronominių stebėjimų).

Koperniko idėjos veikiai sulaukė šalininkų ir greitai ėmė plisti. Ypač aistringas heliocentrinės pasaulio sistemos propaguotojas buvo italų filosofas Džordanas Brunas (*G. Bruno*). Jis žengė dar toliau ir skelbė, kad Visata yra begalinė, kad žvaigždės – tai tolimosios saulės su savo planetų sistemomis. 1609 m. italų fizikas ir astronomas Galilėjas Galilėjus (*G. Galilei*) pirmą kartą mokslo istorijoje astronominiams stebėjimams panaudojo teleskopą. Savo atradimus (Mėnulio kalnus, Jupiterio palydovus, Veneros fazes, Saulės dėmes) Galilėjus laikė neabejotinais Koperniko sistemos teisingumo įrodymais. Jėgos, gynusios geocentrizmą, pradėjo negailestingą kovą prieš heliocentrinės pasaulio sistemos idėją ir jos skleidėjus. Romos inkvizicija Bruną sudegino ant laužo (1600 m.), o Galilėjų privertė viešai išsižadėti savo pažiūrų. Tačiau jokie persekiojimai nebegalėjo sustabdyti mokslo pažangos.

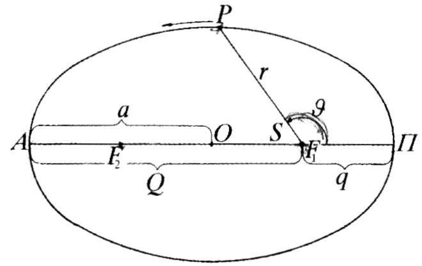


2.6 pav. *Žemės ir išorinės planetos nueitų lankų per apskriejimo sinodinį periodą (šiuo atveju per laiko tarpą, praėjusį tarp dviejų gretimų planetos opozicijų) palyginimas*

2.4. KEPLERIO DĖSNIAI

Tvirtas Koperniko mokymo šalininkas buvo vokiečių astronomas ir matematikas Johanas Kepleris (*J. Kepler*), gyvenęs XVI–XVII a. (1571–1630). Jis ne tiktai rėmė heliocentrinę pasaulio sistemą, bet ryžosi ją patikslinti. Kepleris rėmėsi tiksliais daugelio metų Marso stebėjimų, kuriuos atliko įžymus tų laikų danų astronomas Tichas Brahė (*T. Brahe*), duomenimis ir savo paties stebėjimų rezultatais. Kruopščiai sugretinęs Marso stebėjimų duomenis su įvairiai parinktomis orbitomis, Kepleris galų gale atsisakė per tūkstantmečius įsigalėjusios minties, kad dangaus kūnai gali judėti tik apskritimais ir tolygiai. Kepleris nustatė tris empirinius (paremtus tiktai stebėjimais) planetų judėjimo dėsnius.

Pirmasis dėsnis. Kiekviena planeta skrieja aplink Saulę elipse, kurios viename židinyje (visų planetų jis bendras) yra Saulė.



2.7 pav. *Elipsinė orbita*

Elipsė – tai uždara kreivė, kurios kiekvieno taško atstumų nuo dviejų pastovių taškų F_1 ir F_2, vadinamų ***židiniais***, suma yra pastovi ir lygi didžiajai ašiai $A\Pi$, arba $2a$, čia a – elipsės ***didysis pusašis*** (**2.7** pav.). Elipsės santykį su apskritimu nusako dydis $e = OF_1{:}a$ (OF_1 – židinio atstumas nuo elipsės centro O), vadinamas elipsės ***ekscentricitetu*** (apskritimo $e = 0$).

2.7 pav. parodyta elipsė vaizduoja planetos orbitą, o Saulė S yra elipsės židinyje F_1. Mažiausiai nutolęs nuo Saulės planetos orbitos taškas Π vadinamas ***periheliu*** (gr. *peri* – prie + *helios* – saulė), o labiausiai nutolęs nuo Saulės orbitos taškas A – ***afeliu*** (iš žodžio „apohelis": gr. *apo* – toli + *helios* – saulė). Abu šie taškai vadinami ***apsidėmis*** (gr. *apsis* – skliautas, lankas), o orbitos didžioji ašis $A\Pi$, jungianti apsides – ***apsidžių linija***.

Planetos atstumas nuo Saulės perihelyje

$$q = a(1-e), \tag{2.3}$$

o afelyje

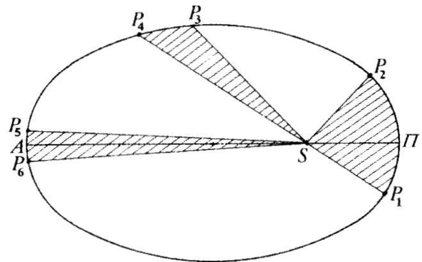
$$Q = a(1+e). \tag{2.4}$$

Vidutinis planetos atstumas nuo Saulės lygus planetos orbitos didžiajam pusašiui a, t. y. $(q + Q){:}2 = a$.

Linija SP, jungianti Saulę su planeta, vadinama planetos ***spinduliu vektoriumi r***, o kampas ΠSP tarp šios linijos ir krypties į orbitos perihelį – ***tikrąja anomalija*** $\boldsymbol{\vartheta}$. Šiais dviem dydžiais nusakoma planetos padėtis orbitoje (tikroji anomalija atskaitoma planetos judėjimo kryptimi).

Antrasis (plotų) dėsnis. Planetos spindulys vektorius per lygius laiko tarpus nubrėžia lygius plotus.

Antrąjį Keplerio dėsnį iliustruoja **2.8** pav. Jame parodyti lygūs plotai, kuriuos planetos spindulys vektorius nubrėžia per tą patį laiką Δt, kai planeta yra arti perihelio (sektorius P_1SP_2) ir arti afelio (sektorius P_5SP_6), taip pat tarpinėje padėtyje (sektorius P_3SP_4). Matyti, kad planetos nueitas lankas P_1P_2 yra didesnis už per tą patį laiką Δt nueitą lanką P_3P_4, o šis savo ruožtu didesnis už lanką P_5P_6. Vadinasi, planetos linijinis greitis orbitoje yra kintamas: **greičiausiai planeta juda perihelyje, o lėčiausiai – afelyje**.



2.8 pav. *Plotų dėsnis*

Trečiasis dėsnis. Planetų apskriejimo aplink Saulę žvaigždinių periodų kvadratai proporcingi jų orbitų didžiųjų pusašių kubams.

Trečiasis Keplerio dėsnis reiškiamas formule

$$\frac{P_1^2}{P_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \tag{2.5}$$

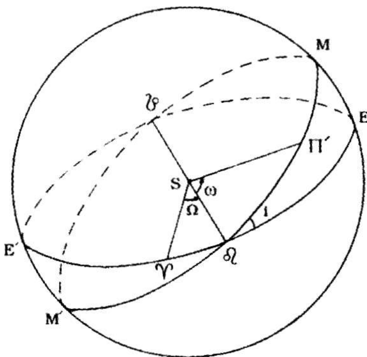
čia P_1 ir P_2 – dviejų planetų apskriejimo žvaigždiniai periodai; a_1 ir a_2 – jų orbitų didieji pusašiai. Periodus P galima matuoti žvaigždiniais metais, o didžiuosius pusašius a – Žemės orbitos didžiuoju pusašiu. Tada, Žemę laikant antrąja planeta, $P_2 = 1$ ir $a_2 = 1$, o $P_1^2 = a_1^3$ arba bendru atveju

$$P = \sqrt{a^3}. \tag{2.6}$$

Trečiasis Keplerio dėsnis sujungia visas planetas į vieningą sistemą. Pagal jį galima apskaičiuoti planetų vidutinius atstumus nuo Saulės, kai yra žinomi jų apskriejimo žvaigždiniai periodai.

2.5. PLANETŲ ORBITŲ ELEMENTAI

2.9 pav. vaizduojama dangaus sfera, kurios centre yra Saulė S. Per dangaus sferą nubrėžti du didieji apskritimai, kuriais ji susikerta su Žemės ir kurios nors kitos planetos orbitų plokštumomis (atitinkamai EE' ir MM'). Ekliptikos plokštuma (Žemės orbitos plokštuma) yra laikoma pagrindine, kai aptariamos planetų (ar kitų Saulės sistemos kūnų) orbitos. Planetos orbitos ir ekliptikos plokštumų susikirtimo linija ☊S vadinama ***mazgų linija***, o taškai, kuriuose ši linija kertasi su ekliptika – ***orbitos mazgais*** – kilimo ir leidimosi (šių dangaus sferos taškų kryptimis stebėtojas, esantis Saulėje, matytų planetos orbitos taškus, kuriais ji kertasi su ekliptikos plokštuma ir kurie taip pat vadinami orbitos mazgais). ***Kilimo mazgas*** ☊ yra tas, kuriame planeta pereina iš neigiamų ekliptinių platumų į teigiamas. Priešinga kryptimi planeta pereina ***leidimosi mazgą***.



2.9 pav. *Orbitos elementai*

Planetos orbitai (elipsinei) ir planetos vietai joje išsamiai apibūdinti reikia 6 dydžių – ***orbitos elementų***. Planetos orbitos plokštumos padėtį erdvėje nusako du elementai: ***orbitos plokštumos posvyris i*** į ekliptikos plokštumą ir ***kilimo mazgo heliocentrinė ilguma*** Ω, t. y. kampas, kurio viršūnėje yra Saulė, o kraštinės sutampa su kryptimis į pavasario lygiadienio tašką ♈ ir kilimo mazgą ☊. Kampas i gali būti nuo 0° iki 180° ($i > 90°$, jeigu kūnas skrieja aplink Saulę priešinga kryptimi negu Žemė). Kampas Ω

matuojamas ekliptikos lanku ♈☊ ir atskaitomas nuo pavasario lygiadienio taško ♈ į rytus: jis gali būti nuo 0° iki 360°.

Trečiasis elementas – ***perihelio nuotolis nuo mazgo*** (arba ***perihelio argumentas***) ω – apibrėžia pačios orbitos orientaciją jos plokštumoje. Tai kampas tarp mazgų linijos *S*☊ ir linijos *SΠ′*, išvestos per Saulę ir orbitos perihelį, arba regimo iš Saulės planetos tako danguje lankas nuo kilimo mazgo ☊ iki taško *Π′*, žyminčio perihelio kryptį. Šis lankas atskaitomas nuo kilimo mazgo planetos skriejimo kryptimi nuo 0° iki 360°.

Kiti du elementai – ***orbitos didysis pusašis a*** ir ***ekscentricitetas e*** – apibūdina orbitos dydį ir formą. Pagaliau reikia žinoti laiką, kada planeta būna tam tikroje orbitos vietoje. Paprastai šeštasis orbitos elementas yra ***perėjimo per perihelį momentas τ***. Parabolinę (pavyzdžiui, kai kurių kometų) orbitą apibūdina tiktai penki elementai: du elementus a ir e atstoja vienas – perihelio nuotolis q ($e = 1$).

Kai kurie planetų orbitų elementai pateikti priedo **2**-oje lentelėje.

Planetų orbitų plokštumų posvyris į ekliptikos plokštumą yra mažas (nuo 0°,8 iki 7°), išskyrus Plutono orbitos plokštumą, kurios $i = 17°$. Dėl orbitų plokštumų nesutapimo su ekliptikos plokštuma planetos tais momentais, kai įvyksta jungtis su Saule, paprastai būna arba į pietus, arba į šiaurę nuo Saulės. O kai planeta ir Žemė maždaug kartu patenka į planetos orbitos mazgų liniją (tai atsitinka retai), planeta pasislepia už Saulės arba praeina jos skrituliu (vidinė planeta apatinėje jungtyje). Jeigu nebūtų planetos orbitos posvyrio, planetos regimasis atgalinis judėjimas vyktų tiesioginio judėjimo linija, t. y. planeta nebrėžtų kilpos.

Planetų orbitos mažai skiriasi nuo apskritimo: jų orbitų ekscentricitetai maži. Išimtį čia sudaro Merkurijaus orbita ($e = 0{,}206$) ir vėlgi Plutono orbita ($e = 0{,}249$). Dėl nemažo Merkurijaus orbitos elipsiškumo jo kampinis nuotolis nuo Saulės didžiausių elongacijų momentais gali būti 18°–28°. Šis intervalas Venerai, turinčiai mažiausio ekscentriciteto (0,007) orbitą, yra gerokai mažesnis – nuo 45° iki 48°.

Orbitos elementams apskaičiuoti paprastai kas keletą savaičių atliekami mažių mažiausiai trys šviesulio stebėjimai kaskart nustatant dvi jo koordinates – rektascensiją ir deklinaciją. Po to išmatuotos šešios koordinatės susiejamos su šešiais nežinomais orbitos elementais ir sudaroma šešių lygčių sistema. Šios labai sudėtingos lygčių sistemos sprendimo būdus nagrinėja teorinė astronomija. Ji taip pat nagrinėja atvirkščią uždavinį – kaip, žinant orbitos elementus, apskaičiuoti šviesulio ***efemerides***, t. y. regimąsias šviesulio padėtis dangaus sferoje (koordinates) ir jo atstumus nuo Žemės (išreikštus Žemės orbitos didžiuoju pusašiu) tam tikriems ateities momentams. Žemės orbitos elementai (ω – perihelio nuotolis nuo pavasario lygiadienio taško, a, e, τ) nustatomi pagal regimąjį Saulės judėjimą, kuris yra Žemės skriejimo aplink Saulę atspindys.

2.6. PARINIS PARALAKSAS

Judančiam stebėtojui atrodo, kad artimesni daiktai slenka tolimesniųjų daiktų fone. Toks daiktų padėties regimasis pokytis vadinamas ***paralaksiniu poslinkiu***. Jis tuo didesnis, kuo arčiau yra daiktas ir kuo toliau viena nuo kitos pradinė ir galinė stebėjimo vietos, t. y. kuo didesnė stebėjimų bazė. Žemė yra pakankamai didelė, kad, žiūrint iš įvairių jos paviršiaus taškų, būtų pastebimas Saulės sistemos kūnų paralaksinis poslinkis tolimųjų žvaigždžių fone. Kitaip sakant, palyginti artimi dangaus šviesuliai iš įvairių Žemės vietų yra matomi skirtingomis kryptimis: skirtingų vietovių stebėtojai nurodys šiek tiek skirtingas to paties šviesulio koordinates. Kad to nebūtų, tenka kažkurį Žemės tašką laikyti pagrindiniu ir į šį tašką suvesti visų stebėjimų duomenis. Tokiu tašku patogu laikyti Žemės centrą. Taigi kryptis į šviesulį iš Žemės centro yra pagrindinė ir ja nusakomos šviesulio ***geocentrinės koordinatės***.

Kampas tarp krypčių į šviesulio M padėtį M' (**2.10** pav.) iš Žemės centro T ir iš stebėjimo taško O vadinamas šviesulio ***pariniu paralaksu p'***. Kita vertus, parinis paralaksas – tai **kampas, kuriuo iš pasirinkto šviesulio būtų matomas stebėjimo vietos Žemės spindulys *R***. Parinis paralaksas p' priklauso nuo šviesulio regimojo (ištaisyto dėl astronominės refrakcijos) zenitinio nuotolio z' (z' kinta per visą parą, todėl ir paralaksas vadinamas pariniu). Kai šviesulys yra stebėjimo vietos zenite, jo parinis paralaksas $p' = 0$. Didžiausias parinis paralaksas būna, kai šviesulys M kerta stebėtojo vietos matematinį horizontą: šiuo atveju parinis paralaksas vadinamas ***horizontiniu paralaksu p***. Taigi horizontinis paralaksas – tai **didžiausias kampas, kuriuo matomas iš pasirinkto šviesulio stebėjimo vietos Žemės spindulys**.

Iš trikampių $OM'T$ ir OMT nustatome, kad

$$\frac{R}{r} = \frac{\sin p'}{\sin(180^o - z')} = \frac{\sin p'}{\sin z'} \text{ ir } \frac{R}{r} = \sin p,$$

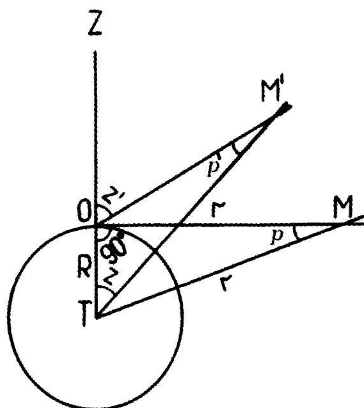
čia r – geocentrinis šviesulio atstumas. Taigi

$$\sin p' = \sin p \sin z'.$$

Dangaus šviesulių stebėjimai rodo, kad kampai p ir p' yra labai maži (paprastai mažesni už 1′, išskyrus Mėnulį, kurio vidutinis $p = 57'$), todėl šių kampų sinusus galima pakeisti pačiais kampais, išreikštais radianais, ir tada

$$p' = p \sin z'. \qquad \textbf{(2.7)}$$

Dėl parinio paralakso šviesulys stebėtojui atrodo esąs arčiau horizonto, negu tai būtų stebint iš Žemės centro (efektas pro-



2.10 pav. *Parinis ir horizontinis paralaksas*

porcingas sin z'). Šviesulio geocentrinis zenitinis nuotolis (galutinis stebėjimų rezultatas)

$$z = z' - p' = z' - p \sin z'. \qquad (2.8)$$

Horizontinį paralaksą p galime nustatyti stebėdami šviesulį M iš dviejų Žemės paviršiaus taškų O_1 ir O_2, esančių maždaug (laikysime – tiksliai) viename geografiniame dienovidinyje (2.11 pav.). Abiejose stebėjimo vietose šviesulio viršutinės kulminacijos momentu, t. y. kartu, išmatuojami jo zenitiniai nuotoliai z_1' ir z_2'. Šiuos zenitinius nuotolius pagal (2.7) formulę atitinka šviesulio pariniai paralaksai $p_1' = p \sin z_1'$ ir $p_2' = p \sin z_2'$. Keturkampio TO_1MO_2, nubraižyto 2.11 pav., kampų suma

$$(\varphi_1 - \varphi_2) + (180° - z_1') + (p_1' - p_2') + (180° + z_2') = 360°,$$

čia φ_1 ir φ_2 – stebėtojų vietų O_1 ir O_2 geografinės platumos (Žemę laikome rutuliu). Tada

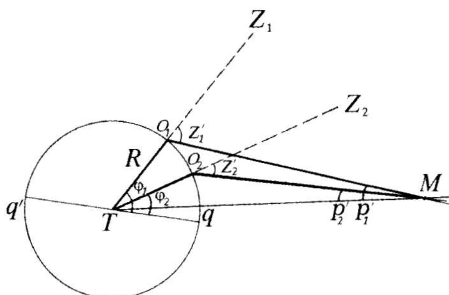
$$p_1' - p_2' = p(\sin z_1' - \sin z_2') = (z_1' - z_2') - (\varphi_1 - \varphi_2),$$

o horizontinis paralaksas

$$p = \frac{(z_1' - z_2') - (\varphi_1 - \varphi_2)}{\sin z_1' - \sin z_2'}. \qquad (2.9)$$

Horizontinį paralaksą dar galima nustatyti pagal stebėjimus, atliktus iš tos pačios Žemės paviršiaus vietos, bet skirtingu laiku (pavyzdžiui, vakare ir ryte). Per laikotarpį, praėjusį tarp stebėjimų, besisukanti apie savo ašį Žemė perkelia stebėtoją iš vieno erdvės taško į kitą, o tai jau sukelia šviesulio paralaksinį poslinkį. Tiktai esant nevienalaikiams stebėjimams, būtina atsižvelgti į šviesulio regimąjį judėjimą žvaigždžių fone.

Labai tiksliai nustatinėjant pačių artimiausiųjų Saulės sistemos kūnų horizontinius paralaksus p, pradeda reikštis Žemės paplokštumo įtaka, t. y. horizontinio paralakso priklausomybė nuo stebėtojo vietos (nuo tos vietos Žemės spindulio R). Kad neliktų neapibrėžtumo nusakant šviesulių horizontinius paralaksus, susitarta standartine baze laikyti pusiaujinį Žemės spindulį R_0 = 6378 km. Horizontinis paralaksas, atitinkantis šį spindulį, vadinamas ***horizontiniu pusiaujiniu paralaksu*** $\boldsymbol{p_0}$. Nesunku įrodyti, jog



2.11 pav. *Horizontinio paralakso nustatymas (qq' – Žemės pusiaujas)*

$$p_0 = p\frac{R_0}{R}. \qquad (2.10)$$

2.7. ATSTUMŲ IKI SAULĖS SISTEMOS KŪNŲ NUSTATYMAS. ASTRONOMINIS VIENETAS

Surasti horizontiniai pusiaujiniai paralaksai ne tiktai padeda stebimas šviesulių koordinates „pririšti“ prie Žemės centro, bet dar suteikia labai reikalingos informacijos apie šviesulių atstumus stebėjimų momentais. Iš **2.10** pav., jame pakeitus R į R_0 ir p į p_0, matyti, kad šviesulio atstumas nuo Žemės centro

$$r = \frac{R_0}{\sin p_0}. \qquad (2.11)$$

Mažo kampo (p_0) sinusą pakeitus pačiu kampu ir išreiškus šį kampą sekundėmis, gaunama:

$$r = \frac{206265''}{p_0''} R_0, \qquad (2.12)$$

čia 206265 – sekundžių skaičius radiane. Atstumai iki šviesulių įvertinami tais pačiais vienetais kaip Žemės pusiaujinis spindulys R_0 (galima laikyti, kad $R_0 = 1$). Žvaigždžių horizontiniai pusiaujiniai paralaksai praktiškai lygūs nuliui ($p_0 < 0'',00004$), todėl (**2.12**) formulė tinka tiktai Saulės sistemos kūnų atstumams nustatyti. Be trigonometrinio metodo, Mėnulio ir artimiausiųjų planetų atstumai dar nustatomi radiolokacijos metodu. Pastaruoju atveju

$$r = \frac{c\Delta t}{2}, \qquad (2.13)$$

čia c – radijo bangų sklidimo greitis; Δt – laikas, per kurį radijo impulsas pasiekia šviesulį ir atsispindėjęs nuo jo grįžta atgal.

Saulės atstumui nustatyti minėti metodai netinka: Saulės horizontinis pusiaujinis paralaksas dėl didelio atstumo, stebėjimo prietaisų įšilimo ir kitų efektų išmatuojamas netiksliai, taip pat netiksliai žinoma, nuo kurių Saulės storos atmosferos sluoksnių atsispindi pasiųstos iš Žemės radijo bangos. Tenka naudotis netiesioginiais atstumo matavimo būdais, kurių yra keletas. Tikslūs rezultatai gaunami remiantis kruopščiai nustatytu (minėtais metodais) ir išreikštu kilometrais kurios nors artimos planetos atstumu nuo Žemės. Tą patį atstumą, bet jau išreikštą Žemės vidutiniu atstumu nuo Saulės, galima apskaičiuoti pagal žinomus Žemės ir tos planetos orbitų elementus bei trečiąjį Keplerio dėsnį. Sugretinę matuotus ir skaičiuotus duomenis, iš karto gauname Žemės vidutinio atstumo nuo Saulės reikšmę kilometrais. Pateiksime labai supaprastintą tokio metodo taikymo pavyzdį. Tarkime, vidinės planetos atstumas r (kilometrais) buvo nustatytas jos apatinės jungties momentu. Ir dar laikykime, kad tuo momentu Žemė, planeta ir Saulė buvo vienoje tiesėje, o Žemės ir planetos atstumai nuo Saulės buvo lygūs jų vidutiniams atstumams, atitinkamai a_0 ir a. Vadinasi, stebėjimo momentu atstumas tarp Žemės ir vidinės planetos, išreikštas

Žemės vidutinio atstumo nuo Saulės a_0 dalimis, buvo $(a_0 - a)/a_0 = 1 - a/a_0$. Tada Žemės vidutinis atstumas nuo Saulės kilometrais

$$a_0 = \frac{r}{1 - a/a_0}.$$

Santykį a/a_0 galima rasti pagal trečiąjį Keplerio dėsnį. Geriausi rezultatai buvo išvesti iš vidinių planetų stebėjimų radiolokacijos metodu.

Vidutinis Žemės atstumas nuo Saulės (Žemės orbitos didysis pusašis a_0) ilgą laiką buvo laikomas astronominių atstumų matavimo vienetu ir vadinamas ***astronominiu vienetu*** (žymimas ***av*** *arba* ***AU***). 1976 m. Tarptautinės astronomų sąjungos suvažiavime dėl priežasčių, paaiškintų **2.13** poskyryje, buvo pakeistas astronominio vieneto apibrėžimas ir priimta, kad **1 av = 149597870 km.** Ši reikšmė vos 45 km mažesnė už a_0. Todėl kartais ir dabar, kai nesivaikoma didelio tikslumo, astronominis vienetas tapatinamas su vidutiniu Žemės atstumu nuo Saulės. Saulės horizontinis pusiaujinis paralaksas $p_0 = 8'',794148$. Dažnai galima naudotis suapvalintomis šių dydžių reikšmėmis: 1 av = $149{,}6 \cdot 10^6$ km, $p_0 = 8'',794$. 1 av atstumą šviesa nulekia per $8^m 19^s$.

Astronominiu vienetu labai patogu išreikšti atstumus Saulės sistemos ribose. Pavyzdžiui, kraštinės Saulės sistemos planetos Plutono vidutinis atstumas nuo Saulės yra tik 39,5 av, o kilometrais tai būtų $5{,}9 \cdot 10^9$ km.

2.8. SAULĖS SISTEMOS ŠVIESULIŲ MATMENŲ IR FORMOS NUSTATYMAS

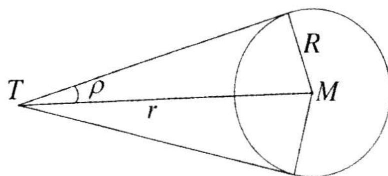
Nustačius šviesulio atstumą (horizontinį pusiaujinį paralaksą) ir išmatavus jo regimąjį kampinį spindulį (skersmenį), galima apskaičiuoti šio šviesulio tikruosius matmenis. Jeigu tam tikru momentu šviesulio M spindulys iš Žemės centro T (sutartinio taško) matomas kampu ρ, o tuo momentu jis yra nuo Žemės atstumu r, tai tikrasis šviesulio spindulys (**2.12** pav.)

$$R = r \sin \rho,$$

arba pagal (**2.11**) formulę

$$R = \frac{\sin \rho}{\sin p_0} R_0,$$

čia R_0 – Žemės pusiaujinis spindulys; p_0 – šviesulio horizontinis pusiaujinis paralaksas. Kampai p_0 ir ρ yra maži (Saulės ir Mėnulio $\rho \approx 16'$, o planetų gerokai mažesni), todėl jų sinusus galima pakeisti pačiais kampais, išreikštais radianais, ir tada



2.12 pav. *Šviesulių matmenų nustatymas*

$$R = \frac{\rho}{p_0} R_0. \quad (\mathbf{2.14})$$

Šviesulių spinduliai išreiškiami kilometrais arba tiesiog pusiaujiniais Žemės spinduliais ($R_0 = 1$).

Norint nustatyti šviesulio formą, reikia spindulius (skersmenis) matuoti įvairiomis kryptimis. Kai šviesulio kampinių matmenų neįmanoma įžiūrėti (šviesulys palyginti mažas arba labai toli), jo didumas ir forma nustatomi specialiais metodais.

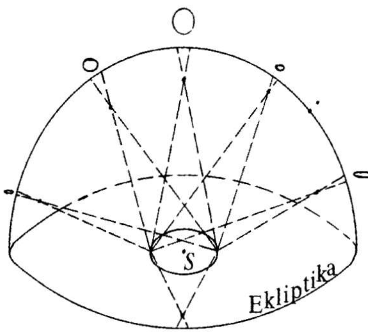
Planetos formos nukrypimą nuo rutulio (dėl sukimosi) apibūdina dydis ***d***, vadinamas planetos ***paplokštumu***. Jis sužinomas iš formulės

$$d = \frac{a-b}{a}, \qquad (2.15)$$

čia a – planetos pusiaujinis ir b – ašigalinis spinduliai.

2.9. ŽVAIGŽDŽIŲ METINIS PARALAKSAS

Žemės orbitos skersmuo (maždaug $300 \cdot 10^6$ km) yra pakankamai didelis, kad būtų galima tikėtis aptikti bent artimiausių žvaigždžių paralaksinius poslinkius, stebint jas iš įvairių orbitos taškų. Tačiau ilgą laiką matavimai nepatvirtino paralaksų buvimo, ir tai buvo rimtas argumentas prieš Koperniko idėją apie Žemės (planetų) skriejimą aplink Saulę. Ir tik patobulinus kampų matavimo prietaisus, XIX šimtmečio viduryje pagaliau pavyko nustatyti kai kurių žvaigždžių labai menkus (mažos lanko sekundės dalys) paralaksinius poslinkius. Tai tapo dar vienu (žr. **2.10**) nepaneigiamu Žemės skriejimo aplink Saulę įrodymu. Pirmoji žvaigždė, kuriai 1838 m. vokiečių astronomas Frydrichas Beselis (*F. W. Bessel*) Karaliaučiaus observatorijoje išmatavo paralaksą, yra Gulbės žvaigždyno žvaigždė, pažymėta 61 numeriu.



2.13 pav. *Paralaksinės elipsės, kurias artimos žvaigždės brėžia dangaus sferoje dėl Žemės skriejimo aplink Saulę (S)*

Stebėtojui skriejant aplink Saulę atrodo, kad artimos žvaigždės lėtai slankioja tolimų (vidutiniškai mažesnio spindesio) žvaigždžių fone ir per metus brėžia dangaus sferoje mažas elipses, kurių didžiosios ašys yra lygiagrečios ekliptikai. Tokios paralaksinės elipsės mažoji ašis yra lygi didžiajai ašiai, padaugintai iš žvaigždės ekliptinės platumos sinuso. Pačioje ekliptikoje paralaksinė elipsė virsta didžiojo apskritimo lanko atkarpa, o ekliptikos poliuose – praktiškai mažu apskritimu (Žemės orbita mažai skiriasi nuo apskritimo). Žvaigždės paralaksinis poslinkis visada yra nukreiptas į Saulės regimąją padėtį: paralaksinės elipsės mažosios ašies

galus žvaigždė praeina, kai jos ir Saulės ekliptinės ilgumos sutampa arba skiriasi 180°, o didžiosios ašies galuose žvaigždė būna, kai jos ir Saulės ekliptinės ilgumos skiriasi ±90°. Kuo toliau nuo Saulės žvaigždė, tuo jos brėžiama paralaksinė elipsė yra mažesnė (**2.13** pav.). Tikrąją (heliocentrinę) žvaigždės padėtį dangaus sferoje žymi jos paralaksinės elipsės centras. Pagal paralaksinį poslinkį nustatomi artimiausių žvaigždžių atstumai.

Kampas, kuriuo iš žvaigždės būtų matomas Žemės orbitos didysis pusašis (vidutinis spindulys arba praktiškai astronominis vienetas) a_0, kai jis yra statmenas krypčiai Žemė – žvaigždė, vadinamas žvaigždės ***metiniu paralaksu π*** (**2.14** pav.). Metinis paralaksas lygus žvaigždės paralaksinės elipsės didžiajam pusašiui. Iš stačiojo trikampio *MTS* matyti, jog atstumas nuo Saulės (*S*) iki žvaigždės (*M*)

$$r = \frac{a_0}{\sin \pi}.$$

Žvaigždžių metiniai paralaksai yra labai maži (<1″), todėl galima teigti (žr. **2.7**), kad

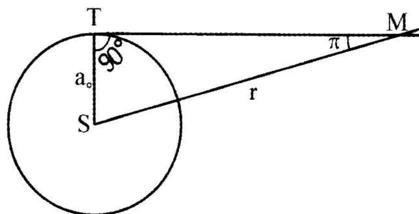
$$r = \frac{206265''}{\pi''} a_0. \qquad (2.16)$$

Matyti, kad astronominis vienetas ($a_0 \approx 1$ av) yra per mažas vienetas atstumams matuoti, kai išeinama už Saulės sistemos ribų. Tarpžvaigždiniams atstumams apibūdinti astronomijoje naudojamas daug stambesnis vienetas – ***parsekas*** (pavadinimas sudarytas iš žodžių „paralaksas“ ir „sekundė“, santrumpa ***pc***). Tai atstumas, kuriame šviesulio metinis paralaksas lygus 1″ (iš tokio atstumo Žemės orbitos didysis pusašis matomas 1″ kampu). Pagal (**2.16**) formulę 1 pc = 206265 av = $3{,}086 \cdot 10^{13}$ km, o bet koks atstumas, išreikštas parsekais,

$$r = \frac{1}{\pi''}. \qquad (2.17)$$

Populiarinamojoje literatūroje dažnai naudojamas lengviau suvokiamas astronominių atstumų matavimo vienetas – ***šviesmetis*** (***šm***). Tai atstumas, kurį šviesa nueina per vienerius atogrąžinius metus: 1 pc = 3,2616 šm.

Metiniai paralaksai, nustatyti pagal žvaigždžių paralaksinį poslinkį, vadinami ***trigonometriniais paralaksais***. Norint juos rasti, labai tiksliai matuojamos žvaigždžių tarpusavio padėtys dangaus nuotraukose, gautose su pusės metų pertrauka (iš priešingų Žemės orbitos taškų). Paralaksus nustatinėja ir specialios astrometrinės observatorijos, skriejančios aplink Žemę kaip dirbtiniai jos palydovai. Orbitinė observatorija HIPPARCOS (žr. **1.20.6**) labai tiksliai išmatavo apie 120 000 žvaigždžių paralaksus. Nuo Žemės paviršiaus per 150 metų pavyko nustatyti paralaksus vos 8100 žvaigždžių.

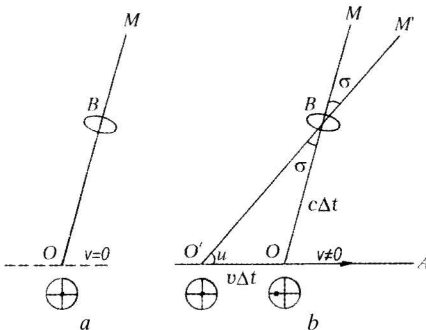


2.14 pav. *Metinis paralaksas*

2.10. ŽVAIGŽDŽIŲ METINĖ ABERACIJA

1728 m. anglų astronomui Džeimsui Bradliui (*J. Bradley*) bandant aptikti žvaigždžių paralaksinį poslinkį, iš tikrųjų buvo pastebėtas metinis žvaigždžių regimosios padėties kitimas, tačiau jis pasirodė besąs kitokio pobūdžio, negu laukiama. Aptikto žvaigždžių poslinkio priežastimi buvo ne stebėtojo, kartu su Žeme skriejančio aplink Saulę, vietos kitimas, bet Žemės judėjimas žvaigždės šviesos spindulių, sklindančių baigtiniu greičiu, atžvilgiu. Reiškinys, kai tam tikru greičiu judąs stebėtojas mato šviesulį ne tikrojoje padėtyje, o šiek tiek pasislinkusį stebėtojo judėjimo kryptimi, buvo pavadintas ***šviesos aberacija*** (lot. *aberratio* – nukrypimas). Žvaigždžių aberacinio poslinkio atradimas tapo istoriškai pirmuoju Žemės skriejimo aplink Saulę įrodymu (žvaigždžių paralaksinis poslinkis buvo pastebėtas tik daugiau kaip po šimto metų).

Įsivaizduokime nejudantį stebėtoją, kuris šviesulį stebi pro teleskopą. Tarkime, teleskopo objektyvo centras yra taške *B*, o teleskopo okuliaro centras, pažymėtas siūlų kryžiumi, – taške *O* (**2.15** pav., *a*). Jeigu šviesulio *M* vaizdas sutaps su okuliaro siūlų kryžiumi, tai linija, išvesta per taškus *O* ir *B*, bus nukreipta į tikrąją šio šviesulio padėtį. Dabar įsivaizduokime, jog tariamasis stebėtojas (ir teleskopas) pradėjo judėti *OA* kryptimi greičiu v (**2.15** pav., *b*). Kol šviesa, plisdama greičiu c, pralėks atstumą *BO*, praeis tam tikras laiko tarpas Δt ($BO = c\Delta t$). Per tą laiką teleskopas spės pasislinkti atstumu $v\Delta t$, ir šviesulio *M* vaizdas nebepateks ant okuliaro siūlų kryžiaus, atrodys, kad šviesulys pakeitė savo vietą dangaus sferoje, o jo vaizdas persikėlė į tašką O' ($OO' = v\Delta t$). Norint teleskopą nustatyti į tą patį šviesulį, reikės jį pakreipti į stebėtojo judėjimo pusę tokiu kampu σ, kad būtų kompensuotas okuliaro poslinkis ir šviesulio vaizdas vėl patektų ant siūlų kryžiaus. Taigi judantis stebėtojas matys šviesulį $O'M'$ kryptimi, kuri su tikrąja OM kryptimi sudaro kampą σ. Šiuo kampu apibūdinamas aberacijos dydis.



2.15 pav. *Šviesos aberacijos reiškinio paaiškinimas (šviesulio vaizdo okuliare poslinkis parodytas nesilaikant geometrinio brėžinio mastelio)*

Iš trikampio OBO' matyti, kad

$$\sin\sigma = \frac{v}{c}\sin u,$$

čia u – kampas tarp stebėtojo greičio krypties ir regimosios krypties į šviesulį. Aberacijos kampas σ paprastai yra labai mažas ($v << c$), todėl pastarąją lygtį galima užrašyti kitaip (žr. **2.7**):

$$\sigma = 206265'' \frac{v}{c}\sin u. \qquad (\mathbf{2.18})$$

Tarp visų žemiškųjų greičių didžiausiu greičiu juda pati Žemė. Todėl šviesos aberacijos reiškinys, lydintis stebė-

toją jo metinėje kelionėje aplink Saulę, yra palyginti nesunkiai pastebimas. Šviesos aberacija, kurią sukelia Žemės skriejimas aplink Saulę, vadinama ***metine aberacija***. Vidutinis Žemės (stebėtojo) skriejimo aplink Saulę greitis $v = 29{,}79$ km/s. Tada pagal (**2.18**) formulę metinės aberacijos kampas

$$\sigma_m = 20'',5 \sin u, \qquad (2.19)$$

čia u – kampinis šviesulio regimosios padėties atstumas nuo dangaus sferos taško, į kurį pasirinktu stebėjimo momentu nukreiptas Žemės greičio vektorius. Šis taškas vadinamas Žemės judėjimo ***apeksu*** (lot. *apex* – smaigalys), ir į jį yra nukreiptas šviesulio aberacinis poslinkis. Skaičius 20″,5 yra vadinamas ***aberacijos konstanta***.

Žemės judėjimo apeksas yra ekliptikoje, ir per metus jis apibėga visą ratą. Vadinasi, per visus metus kinta ir šviesulio aberacinio poslinkio kryptis. Jeigu žvaigždė yra ekliptikos poliuje ($u = 90°$), tai stebėtojui atrodo, jog ji per metus apibrėžia apie tikrąją savo padėtį apskritimą, kurio spindulys lygus 20″,5. Kitų žvaigždžių regimosios padėtys slenka elipsėmis, kurių didysis pusašis lygus 20″,5, o mažasis pusašis – 20″,5sinβ, čia β – žvaigždės ekliptinė platuma. Ekliptikoje ($\beta = 0°$) aberacinės elipsės pavirsta į 41″ ilgio lankus.

Žvaigždžių aberaciniai poslinkiai skiriasi nuo paralaksinių poslinkių, ir nėra pavojaus juos supainioti. Žvaigždės paralaksinis poslinkis visada nukreiptas į Saulės pusę, o aberacinis poslinkis – į ekliptikos tašką (į Žemės judėjimo apeksą), esantį 90° į vakarus nuo Saulės. Žvaigždė pro aberacinės elipsės didžiosios ašies galus praeina tais momentais, kai skirtumas tarp jos ir Saulės ekliptinių ilgumų yra 0° arba 180°, o kai šis skirtumas lygus ±90°, žvaigždė būna mažosios ašies viršūnėse. Visų žvaigždžių aberacinių elipsių didieji pusašiai yra vienodi (20″,5), o paralaksinių elipsių didieji pusašiai priklauso nuo žvaigždės atstumo ir yra daug mažesni (<1″).

Kur kas sunkiau aptikti abercijos reiškinį, susijusį su stebėtojo judėjimu apie Žemės ašį, vadinamąją ***parinę aberaciją***. Žemės paviršiaus taško, esančio geografinėje platumoje φ, linijinis greitis $v = v_0 \cos\varphi$; čia v_0 – Žemės pusiaujo taškų greitis lygus 465 m/s. Taigi pagal (**2.18**) formulę parinės aberacijos kampas $\sigma_p = 0'',32 \cos\varphi \sin u$, čia u – kampinis šviesulio atstumas nuo rytų taško (stebėtojas sukasi į rytus). Matyti, jog geriausiu atveju parinė oberacija tėra tik 0″,32.

2.11. ŽEMĖS SUKIMASIS APIE AŠĮ

Parinį žvaigždėtojo dangaus sukimąsi Kopernikas teisingai aiškino Žemės sukimusi apie ašį, tačiau tam griežtų įrodymų jis dar negalėjo pateikti. Tiktai gerokai vėliau buvo suprasta, kad kai kurie gamtos reiškiniai, vykstantys Žemės paviršiuje, yra neabejotinai susiję su Žemės sukimusi apie savo ašį. Pagaliau įrodant, kad Žemė sukasi, buvo atlikti specialūs bandymai.

Jau pats Žemės paplokštumas rodo, kad ji sukasi, nes priešingu atveju pagal mechanikos dėsnius ji turėtų būti rutulio formos. Tiktai iš paplokštumo negalima nustatyti Žemės sukimosi krypties.

Dėl Žemės sukimosi apie ašį iš vakarų į rytus kūnai, laisvai judantys Žemės paviršiuje, Šiaurės pusrutulyje turi nukrypti nuo judėjimo krypties į dešinę, o Pietų pusrutulyje – į kairę (***Koriolio jėga***). Kad taip iš tikrųjų yra, rodo jūrų srovės, pastovūs tropinių sričių vėjai, pučiantys pusiaujo link – pasatai (Šiaurės pusrutulyje jie pučia iš šiaurės rytų, o Pietų pusrutulyje – iš pietryčių), pastovūs sezoniniai vėjai – musonai. Oro masės ciklone, užuot slinkusios iš jo pakraščių į centrą (mažo slėgio zoną) trumpiausiu keliu, dėl minėtos Žemės sukimosi įtakos nukrypsta ir juda spirale, sudarydamos vėjo sūkurį, kuris Šiaurės pusrutulyje sukasi prieš laikrodžio rodyklę, o Pietų pusrutulyje – pagal laikrodžio rodyklę. Jeigu judantis kūnas sutinka kokią nors kliūtį, tai jis ją slegia, pavyzdžiui, iš kairės į dešinę (Šiaurės pusrutulyje). Gerai žinoma, jog Šiaurės pusrutulyje upių srovės labiau ardo (paplauna) dešiniuosius krantus, o Pietų pusrutulyje – kairiuosius.

Nuo XIX a. pradžios buvo bandoma susekti Žemės sukimąsi pagal tai, kaip krinta kūnas, mestas iš aukšto bokšto (ar į gilią šachtą). Bokšto viršūnė juda iš vakarų į rytus didesniu linijiniu greičiu negu bokšto pagrindas, kuris yra arčiau Žemės sukimosi ašies. Iš bokšto viršūnės paleistas laisvai kristi kūnas iš inercijos palaiko savo pradinį į rytus nukreiptą greitį ir turi aplenkti bokšto pagrindą, t. y. turi nukristi truputį į rytus nuo jo. Krintančio kūno nukrypimui į rytus x apskaičiuoti yra išvesta formulė

$$x = \frac{4\pi}{3T}\sqrt{\frac{2h^3}{g}}\cos\varphi,$$

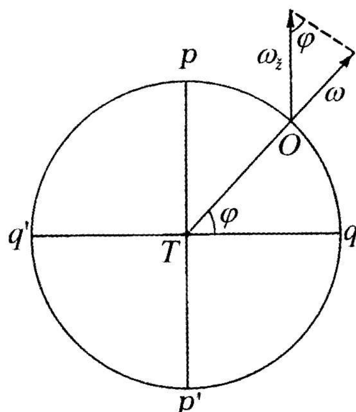
čia T – Žemės apsisukimo apie ašį periodas (žvaigždinė para – $23^h56^m04^s$ = 86164^s vidutinio saulinio laiko); h – kūno kritimo aukštis; g – laisvojo kritimo pagreitis ir φ – bandymo vietos geografinė platuma. Jeigu, pavyzdžiui, $\varphi = 0°$, o $h = 100$ m, tai krintančio kūno nukrypimas į rytus $x = 22$ mm. Praktiškai tyrinėjant atskleisti tokius mažus nukrypimus labai sunku, nes, be Žemės sukimosi, krintantį kūną veikia dar kiti faktoriai (oro turbulencija, vėjas). Vis dėlto labai kruopščiai parengti bandymai duodavo kūno nukrypimo į rytus vertes, artimas apskaičiuotosioms.

Iš mechanikos žinoma, kad paleistas laisvai svyruoti kūnas nekeičia savo svyravimų plokštumos. Ši svyruoklės savybė leidžia nesunkiai ir labai akivaizdžiai įrodyti Žemės sukimąsi apie ašį. Pirmąjį tokio tipo eksperimentą atliko 1851 m. prancūzų fizikas Leonas Fuko (*B. L. Foucault*).

Tarkime, ***Fuko svyruoklė*** (taip dabar vadinamos svyruoklės, skirtos Žemės sukimuisi stebėti) yra pakabinta Šiaurės ašigalyje. Čia esantis stebėtojas matys, kaip svyruoklės svyravimų plokštuma pastoviu kampiniu greičiu, 15° per žvaigž-

dinę valandą, sukasi apie vertikaliąją liniją laikrodžio rodyklės judėjimo kryptimi, t. y. iš rytų į vakarus. Bet svyravimų plokštuma negali savaime keistis, vadinasi, stebėtojui taip tik atrodo, o iš tikrųjų po svyruokle sukasi pati Žemė (ir stebėtojas), tik priešinga kryptimi – iš vakarų į rytus.

Tolstant nuo ašigalių, Žemės sukimosi įtaka svyruoklės regimajam judėjimui mažėja. Jeigu svyruoklė yra geografinėje platumoje φ, tai jos plokštumos sukimosi Žemės paviršiaus atžvilgiu kampinis greitis ω yra lygus Žemės sukimosi kampinio greičio $\omega_{\check{Z}}$ vektoriaus projekcijai į vertikaliąją liniją, išvestą per svyruoklės pakabinimo tašką O (**2.16** pav.), t. y.



2.16 pav. *Sąryšis tarp Fuko svyruoklės svyravimų plokštumos ir Žemės sukimosi kampinių greičių*

$$\omega = \omega_{\check{Z}} \sin\varphi$$

Žemės pusiaujuje ($\varphi = 0°$) svyruoklės svyravimų plokštuma yra parimusi aplinkinių daiktų atžvilgiu. Kitur ji per žvaigždinę valandą pasisuka $15° \sin\varphi$ kampu, pavyzdžiui, Vilniuje – 12°,2 kampu. Pietų pusrutulyje regimasis svyravimų plokštumos sukimasis vyksta prieš laikrodžio rodyklę.

1931 m. Sankt Peterburgo Isakijaus sobore buvo įrengta 98 m ilgio ir 54 kg masės Fuko svyruoklė. Užtekdavo prie šios didingos svyruoklės (dabar jos nebėra) praleisti 1–2 minutes, kad įsitikintum Žemės sukimosi tikrumu. Pats Fuko 1851 m. po Paryžiaus Panteono kupolu įrengė svyruoklę, kurią sudarė 28 kg masės rutulys, pakabintas ant 67 m ilgio vielos.

2.12. VISUOTINĖS TRAUKOS DĖSNIS

Kepleris, paskelbęs empirinius planetų judėjimo dėsnius, dar negalėjo teisingai paaiškinti, kodėl planetos juda taip, o ne kitaip. Tikrąją priežastį, dėl kurios planetos skrieja aplink Saulę uždaromis orbitomis ir nenutolsta nuo jos, nurodė didysis anglų mokslininkas Izaokas Niutonas (*I. Newton*). Jis sukūrė mechanikos – mokslo apie kūnų judėjimą – pagrindus ir pritaikė mechanikos dėsnius dangaus kūnų judėjimui tirti.

Visų pirma Niutonas, remdamasis Keplerio nustatytais planetų judėjimo dėsniais ir savo suformuluotais pagrindiniais mechanikos dėsniais, įrodė, kad jėga, veikianti planetą, visada yra nukreipta į Saulę (vadinasi, tai traukos jėga), o jos didumas tiesiog proporcingas Saulės bei planetos masėms ir atvirkščiai proporcingas planetos atstumo nuo Saulės kvadratui.

Toliau Niutonas įrodė, kad traukos (gravitacijos) jėga, verčianti planetas nukrypti nuo tiesiaeigio judėjimo, savo fizikine prigimtimi yra tapati sunkio

jėgai, veikiančiai Žemės paviršiuje. Čia jis rėmėsi Mėnulio skriejimu aplink Žemę. Sunkio jėga laisvai krintantiems kūnams ties Žemės paviršiumi suteikia pagreitį $g = 9{,}81\ \mathrm{m/s^2}$. Jeigu sunkio jėga yra tapati savitarpio traukos jėgai tarp Saulės ir planetos, tai, tolstant nuo Žemės, ji, o drauge ir laisvojo kritimo pagreitis, turi mažėti proporcingai atstumo kvadratui. Mėnulio orbita yra maždaug 60 kartų toliau nuo Žemės centro negu kūnas Žemės paviršiuje, todėl laisvojo kritimo pagreitis Mėnulio atstume g' turi būti

$$g' = \frac{g}{60^2} = \frac{9{,}81}{3600}\ \mathrm{m/s^2} = 0{,}0027\ \mathrm{m/s^2}.$$

Taip apskaičiuotą rezultatą galima palyginti su Mėnulio įcentriniu pagreičiu $a_{įc}$, išvestu iš jo judėjimo duomenų (žr. **2.19–2.20**). Mėnulio orbitos vidutinis spindulys $r = 60 \times 6378 \times 10^3$ m, apskriejimo aplink Žemę periodas $P = 27{,}3$ paros $= 27{,}3 \times 86400$ s, todėl jo įcentrinis pagreitis

$$a_{įc} = \frac{(2\pi)^2}{P^2} r = \frac{(2\pi)^2}{(27{,}3 \cdot 86400)^2} 60 \cdot 6378 \cdot 10^3\ \mathrm{m/s^2} = 0{,}0027\ \mathrm{m/s^2}.$$

Apskaičiuoto ir išmatuoto pagreičio verčių sutapimas įtikino Niutoną, jog kūnai krinta į Žemę, Mėnulis skrieja aplink Žemę, planetos skrieja aplink Saulę dėl tos pačios prigimties jėgų veikimo, būdingo visiems Visatos kūnams. 1687 m. Niutonas suformulavo ***visuotinės traukos dėsnį***: **dalelė, kurios masė m_1, traukia kitą dalelę, kurios masė m_2, jėga, tiesiog proporcinga tų masių sandaugai ir atvirkščiai proporcinga jų atstumo r kvadratui**:

$$\vec{F} = -G\frac{m_1 m_2 \vec{r}}{r^3}, \qquad (\mathbf{2.20})$$

čia $\vec{r}/r$ – vienetinis vektorius, nukreiptas iš m_1 į m_2, o G – proporcingumo koeficientas. Šis koeficientas vadinamas ***gravitacijos konstanta***. Ji nustatoma eksperimentiškai. SI sistemoje $G = 6{,}672 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}}$.

(**2.20**) formulė, išreiškianti Niutono visuotinės traukos dėsnį, tinka materialiesiems taškams. Tačiau ji galioja ir realiesiems kūnams, jei juos galima laikyti materialiaisiais taškais, t. y. jei atstumai tarp jų yra daug didesni už jų matmenis. Pastaroji sąlyga nereikalinga, kai kūnai yra rutulio formos, o masė juose pasiskirsčiusi simetriškai. Šiuo atveju kūnai traukia vienas kitą taip, tarsi jų masės būtų sutelktos rutulių centruose.

Niutono visuotinės traukos dėsniu remiasi svarbi mokslo šaka – dangaus mechanika.

2.13. DVIEJŲ KŪNŲ UŽDAVINYS. APIBENDRINANTIEJI KEPLERIO DĖSNIAI

Niutonas, pasinaudojęs Keplerio nustatytais empiriniais planetų judėjimo dėsniais, išvedė visuotinės traukos dėsnį, o paskui išsprendė ir atvirkščią uždavinį: iš visuotinės traukos dėsnio išvedė visus tris Keplerio dėsnius, tiktai jau bendresniu pavidalu. Niutonas nagrinėjo dviejų kūnų (pavyzdžiui, Saulės ir planetos) judėjimą, veikiant tik jų tarpusavio traukos jėgai ir neįskaitė kitų kūnų (pavyzdžiui, kitų planetų) traukos įtakos. Kitaip tariant, Niutonas sprendė vadinamąjį ***dviejų kūnų uždavinį***.

Tarkime, dviejų kūnų (tiksliau – materialiųjų taškų) masės yra M ir m, o atstumas tarp jų – r. Paprastai yra nagrinėjamas ne absoliutinis kūnų judėjimas, bet santykinis, t. y. vieno kūno judėjimas kito kūno atžvilgiu. Masės M kūnas (jį laikome centriniu) traukia masės m kūną jėga $-GMm/r^2$ ir suteikia jam pagreitį $-GM/r^2$. Savo ruožtu tokio pat dydžio, bet priešingos krypties jėga masės m kūnas traukia masės M kūną ir suteikia pastarajam pagreitį Gm/r^2. Tada masės m kūno pagreitis masės M kūno atžvilgiu yra $-GM/r^2 - Gm/r^2 = -G(M + m)/r^2$. Masės m kūno santykinio pagreičio projekcijos į stačiakampės koordinačių sistemos, kurios pradžia sutampa su masės M kūnu, ašis duoda tris antrosios eilės diferencialines lygtis, apibūdinančias santykinį judėjimą:

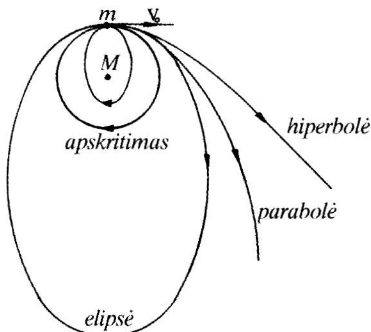
$$\frac{d^2x}{dt^2} = -G(M+m)\frac{x}{r^3};$$
$$\frac{d^2y}{dt^2} = -G(M+m)\frac{y}{r^3}; \qquad (2.21)$$
$$\frac{d^2z}{dt^2} = -G(M+m)\frac{z}{r^3}.$$

Šio tipo lygčių sprendimas (integravimas) nagrinėjamas teorinės mechanikos kursuose, todėl čia apsiribosime tik jų sprendinių aptarimu.

Sprendinys, aprašantis kūno santykinės orbitos formą, gaunamas tokio pavidalo:

$$r = \frac{p}{1 + e\cos\vartheta}. \qquad (2.22)$$

Tai antrosios eilės kreivių (kūgio pjūvių) lygtis polinėse koordinatėse, čia r – masės m kūno spindulys vektorius; ϑ – tikroji anomalija (žr. **2.4**); e – kreivės ekscentricitetas ir p – kreivės parametras. Taigi *veikiant visuotinės traukos jėgoms, vienas dangaus kūnas kito dangaus kūno gravitacijos lauke gali judėti* arba **apskritimu** ($e = 0$), arba **elipse** ($e < 1$), arba **parabole** ($e = 1$), arba **hiperbole** ($e > 1$) (**2.17** pav.). Taip ***apibendrintas pirmasis Keplerio dėsnis*** tinka ne tik



2.17 pav. *Dviejų kūnų uždavinys*

planetoms, bet ir planetų palydovams, dirbtiniams kosminiams kūnams, visoms kometoms, dvinarėms žvaigždėms ir kt.

Orbitos forma priklauso nuo pradinio greičio, o apskritai kūno greitį v atstumu r nuo centrinio kūno nusako formulė

$$v^2 = G(M+m)\left(\frac{2}{r}-\frac{1}{a}\right), \qquad (2.23)$$

čia a – orbitos didysis pusašis. Iš šios formulės matyti, kad atstumu r kūnas judės apskritimu ($a = r$), kai greitis

$$v = v_a = \sqrt{\frac{G(M+m)}{r}}, \qquad (2.24)$$

ir parabole ($a = \infty$), kai

$$v = v_p = \sqrt{\frac{2G(M+m)}{r}} = v_a \cdot \sqrt{2}. \qquad (2.25)$$

Greitis v_a vadinamas ***apskritiminiu greičiu***, o v_p – ***paraboliniu greičiu***. Jeigu $0 < v < v_p$ (išskyrus $v = v_a$), kūnas skries elipse, o jeigu $v > v_p$ – hiperbole.

Dangaus mechanikoje (**2.23**) formulė vadinama ***energijos integralu***. Kitokią prasmę turi taip pat iš (**2.21**) lygčių išvedamas ***plotų integralas***

$$r^2 \frac{d\vartheta}{dt} = const. \qquad (2.26)$$

Kairiojoje šios formulės pusėje yra sudvejinto sektorinio greičio (spindulio vektoriaus r brėžiamo ploto išvestinės pagal laiką) išraiška. Vadinasi, *kūno sektorinis greitis yra pastovus dydis* arba kitaip – *kūno spindulio vektoriaus brėžiamas plotas yra proporcingas laikui*. Taigi (**2.26**) formulė matematiškai išreiškia ***antrąjį Keplerio (plotų) dėsnį***.

Jeigu masės m kūnas skrieja aplink masės M kūną spindulio r apskritimu, tai jo santykinis pagreitis $G(M + m)/r^2$ yra tas pats, kas įcentrinis pagreitis $4\pi^2 r/P^2$, čia P – kūno apskriejimo periodas. Tada

$$\frac{P^2(M+m)}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G} = const. \qquad (2.27)$$

Tokio pat pavidalo formulė gaunama ir elipsinės orbitos atveju, tiktai tada spindulį r pakeičia orbitos didysis pusašis a. Prisiminus tai ir lygtis, parašytas pagal (**2.27**) formulę dviem dviejų kūnų sistemoms (pažymėtoms indeksais „1“ ir „2“), padalijus vieną iš kitos, gaunama:

$$\frac{P_1^2(M_1+m_1)}{P_2^2(M_2+m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \qquad (2.28)$$

Tai ***apibendrintojo (patikslintojo) trečiojo Keplerio dėsnio*** išraiška. Taikant šią išraišką dviem planetoms, skriejančioms aplink bendrą centrinį kūną – Saulę ($M_1 = M_2 = M$), ir nepaisant planetų masių (m_1 ir $m_2 << M$), gaunamas empirinis trečiasis Keplerio dėsnis (žr. (**2.5**) formulę).

Dviejų kūnų sistemoje kūnų absoliutinio (bendro masių centro atžvilgiu) judėjimo ir santykinio judėjimo orbitos yra panašios, o jų didžiųjų pusašių santykis

$$a : A : (A + a) = M : m : (M + m).$$

Dangaus mechanikoje laiko vienetu laikoma viena para lygi 86 400 sekundžių, masės vienetu – Saulės masė, ilgio vienetu – astronominis vienetas (žr. **2.7**). Pastarasis istorijos bėgyje kito – lėmė astronominių stebėjimų tikslumo augimas.

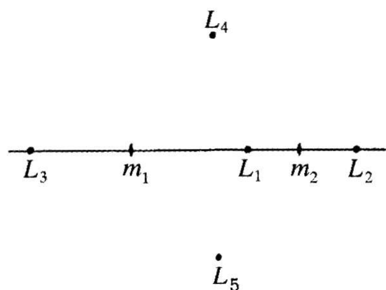
Astronominėje vienetų sistemoje gravitacijos konstanta žymima k^2 ($G = k^2$), o dydis k vadinamas ***Gauso gravitacijos konstanta***. Ji nustatyta pagal (**2.27**) formulę pritaikytą sistemai Saulė – Žemė su Mėnuliu (joje reikia pakeisti G į k^2, r į a_0 ir P į T). Būtent,

$$k = \frac{2\pi a_0^{3/2}}{T\sqrt{m_S + (m_Ž + m_M)}}$$

čia a_0 – Žemės orbitos didysis pusašis, T – žvaigždiniai metai išreikšti paromis, m_S, $m_Ž$ ir m_M – Saulės, Žemės ir Mėnulio masės išreikštos Saulės mase ($m_S = 1$). Karlas Gausas (*K. F. Gauss*) astronominiu ilgio vienetu laikė Žemės orbitos didįjį pusašį, t. y. priėmė, jog $a_0 = 1$. Tada pagal nustatytas T, $m_Ž$ ir m_M vertes išėjo, kad Gauso gravitacijos konstanta $\mathbf{k = 0{,}01720209895}$. Vėlesnis T, o ypač $m_Ž$ ir m_M verčių patikslinimas (žr. **2.16**) vertė keisti k reikšmę, bet to nebuvo daroma, nes ji jau buvo aprėpusi daugelį teorinės astronomijos sprendinių. Todėl, kad galiotų ankstesnė formulė, teko atsisakyti a_0 kaip ilgio vieneto. Taigi dabar ilgio vienetu, vadinamu **astronominiu vienetu (av)**, laikomas ilgis, kuriam esant Gauso gravitacijos konstanta turi minėtą (nepakeistą) reikšmę. Galima ir taip sakyti: astronominis vienetas lygus *spinduliui apskritiminės orbitos, kuria aplink Saulę skrietų nykstamai mažos masės kūnas 2π/k parų periodu*. Ankstesnį ir dabartinį astronominius ilgio vienetus sieja tokia lygybė: $a_0 = 1{,}00000031$ av.

2.14. TRIJŲ IR *N* (DAUGELIO) KŪNŲ UŽDAVINYS

Norint nustatyti, kaip juda trys kūnai, traukiantys vienas kitą jėga, atvirkščiai proporcinga atstumo tarp jų kvadratui, reikia spręsti uždavinį, vadinamą ***trijų kūnų uždaviniu***. Trijų kūnų uždavinyje kūnų judėjimą išreiškia devynios ($3n$) antrosios eilės diferencialinės lygtys. Jas spręsti labai sunku ir bendru atveju iki šiol nepavyko išvesti formulių, kurios aiškiai aprašytų visų trijų kūnų judėjimo trajektorijos formą ir leistų numatyti jų padėtį erdvėje bet kuriuo laiko momentu. Tačiau yra atvejų, kai trijų kūnų uždavinys gali būti tiksliai



2.18 pav. *Lagranžo taškai*

išspręstas. Juos 1772 m. nurodė prancūzų matematikas ir mechanikas Žozefas Lagranžas (*J. L. Lagrange*). Šiais atvejais trečiasis kūnas turi būti viename iš penkių taškų, kurie vadinami ***libracijos*** (lot. *libratio* – svyravimas), arba ***Lagranžo***, taškais. Trys Lagranžo taškai L_1, L_2 ir L_3 (**2.18** pav.) yra tiesėje, kuri eina per pirmuosius du kūnus (m_1 ir m_2); L_1 yra tarp tų kūnų, L_2 – į vieną pusę ir L_3 – į kitą pusę nuo jų. Konkrečios šių taškų padėtys priklauso nuo kūnų masių santykio. Taškai L_4 ir L_5 su kūnais m_1 ir m_2 sudaro lygiakraščius trikampius. Taigi *jeigu trečiasis kūnas yra kuriame nors Lagranžo taške, tai visi trys kūnai juda plokštumoje (kurioje jie yra) vienodos rūšies antrosios eilės kreivėmis, o santykiai tarp jų tarpusavio atstumų visą laiką lieka nepakitę.*

Astronomijoje ir kosmonautikoje didelę reikšmę turi supaprastintas trijų kūnų uždavinys, kai trečiojo kūno masė yra labai maža ir jis neturi įtakos kitų dviejų kūnų skriejimui aplink bendrą jų masių centrą.

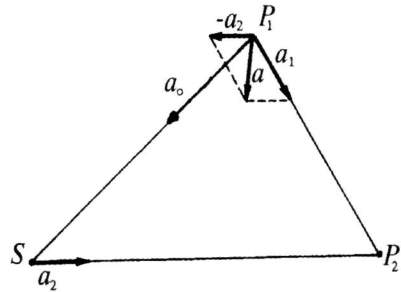
Aišku, daugelio (n) kūnų uždavinys yra dar sudėtingesnis negu trijų kūnų uždavinys. Čia apytikslis vaizdas apie painų pasirinktojo kūno judėjimą gaunamas nuoseklaus artėjimo metodu atskirai įvertinant kiekvieno kito kūno traukos jėgų poveikį jam. Tokiu pat būdu tikslinamos ir Saulės sistemos kūnų orbitos, nes Saulės sistema – tai taip pat daugelio kūnų sistema.

2.15. SAULĖS SISTEMOS KŪNŲ ORBITŲ TRIKDYMAI

Saulės sistemos kūnų judėjimas aplink Saulę yra daug sudėtingesnis negu paprastas judėjimas apskritimu, elipse, parabole ar hiperbole, nes juos, be Saulės, dar veikia savitarpio traukos jėgos. Tiktai šiuo atveju nukrypimai nuo Keplerio dėsnių (dviejų kūnų uždavinio) paprastai yra maži, nes Saulės masė yra daug didesnė už kitų sistemos kūnų masę (Saulės masė maždaug 750 kartų didesnė už visų kitų Saulės sistemos kūnų masių sumą) ir jos trauka yra vyraujanti. Bet kurio Saulės sistemos kūno orbita iš pradžių nustatoma atsižvelgus tik į Saulės poveikį, o po to jau paeiliui įskaitoma kitų kūnų traukos įtaka. Kūno orbitos nuokrypiai nuo Keplerio orbitos vadinami ***trikdymais***, arba ***perturbacijomis*** (lot. *perturbatio* – suirimas).

Orbitų trikdymų apskaičiavimas yra labai ilgas ir sunkus uždavinys, nes, kintant kūnų tarpusavio padėčiai, be paliovos kinta trikdančiųjų jėgų dydis ir kryptis. **2.19** pav. parodyta, kaip atsiranda trikdančioji jėga ir koks yra jos pobūdis. Jame taškas S žymi Saulę, taškas P_1 – kūną, kurio judėjimas mus domina, ir taškas P_2 – trikdantįjį kūną (planetą). Kūnas P_2 traukia kūną P_1 ir Saulę, ir

suteikia jiems pagreičius, atitinkamai a_1 ir a_2. Tada kūno P_2 traukos sukeltas kūno P_1 pagreitis a Saulės atžvilgiu (priimta laikyti Saulę nejudančia) bus lygus pagreičių a_1 ir a_2 geometriniam skirtumui. Taigi trikdančioji jėga susidaro dėl trikdančiojo kūno poveikio ne tik duotajam kūnui, bet ir Saulei. Trikdančioji jėga yra nukreipta į trikdomąjį kūną tik tada, kai kūnai P_1 ir P_2 yra vienoje tiesėje su Saule ir vienoje jos pusėje, o visais kitais atvejais trikdančiosios jėgos kryptis nesutampa su kryptimi į trikdomąjį kūną. **2.19** pav. a_0 – tai kūno P_1 pagreitis Saulės atžvilgiu, sukeltas tiktai Saulės traukos, t. y. judėjimo pagal Keplerio dėsnius pagreitis.



2.19 pav. *Trikdantysis pagreitis*

Saulės sistemos kūnų orbitų trikdymus galima pavaizduoti stačiakampėje ar polinėje koordinačių sistemose, bet patogiausia trikdymus išreikšti orbitos elementais (žr. **2.5**). Pastaruoju atveju laikoma, kad kūnas kiekvienu momentu skrieja Keplerio orbita, tačiau tokia, kurios elementai visą laiką kinta. Kūnų orbitų elementų pokyčiai vadinami ***orbitų elementų trikdymais***. Trikdymai, kurių dydis kinta periodiškai, vadinami ***periodiniais***, o tie, kurių dydis maždaug proporcingas laikui (kinta viena linkme) – ***šimtmetiniais***, arba ***sekuliariniais***.

Periodinius trikdymus daugiau ar mažiau patiria visi planetų orbitų elementai. Aišku, labiau domina šimtmetiniai trikdymai, nes nuo jų priklauso Saulės sistemos ateitis. Šio pobūdžio trikdymus, kaip rodo skaičiavimai, patiria tiktai kilimo mazgo ilguma Ω ir perihelio nuotolis nuo mazgo ω, t. y. tie orbitų elementai, kurių kitimas nekelia pavojaus Saulės sistemos stabilumui. Tačiau teorija negali aprėpti labai ilgų laikotarpių, ir šiandieną sunku numatyti tai, kas bus po daugelio milijonų metų.

Kitaip yra su smulkesniais Saulės sistemos kūnais – asteroidais, kometomis. Šiems kūnams skriejant arti didžiųjų planetų, trikdymai pasidaro labai dideli ir jų orbitos smarkiai pasikeičia.

Dėl trikdymų, kaip matėme, nuolat kinta planetos orbitos perihelio nuotolis nuo mazgo, t. y. planetos orbita lėtai sukasi savo plokštumoje planetos skriejimo kryptimi. Jau XIX a. buvo nustatyta, kad Merkurijaus perihelis juda greičiau, negu rodo teoriniai skaičiavimai, atlikti pagal Niutono traukos teoriją. Stebėjimai rodė, kad Merkurijaus perihelis per šimtmetį pasislenka 575″, o tai 43″ per daug. Šį klasikinės mechanikos požiūriu nesuprastą faktą puikiausiai paaiškino Einšteino bendroji reliatyvumo teorija (kartu tai buvo vienas jos įrodymų). Reliatyvistiniai efektai pasireiškia ir kitų tolimesnių nuo Saulės planetų orbitų perihelio judėjime, tiktai daug silpniau. Dėl to, pavyzdžiui, Žemės orbitos perihelis per šimtą metų pasislenka 3″,8.

Įdomus planetos orbitos trikdymų panaudojimo pavyzdys – naujos planetos, pavadintos Neptūnu, atradimas. 1781 m. anglų astronomas Viljamas Heršelis

(*W. Herschel*) teleskopu atrado Uraną. Šios planetos judėjime buvo pastebėta trikdymų, kurių buvo neįmanoma paaiškinti žinomų planetų poveikiu. Kilo mintis, kad Urano orbitos papildomus trikdymus sukelia dar nežinoma planeta, esanti toliau Urano. Pagal tuos trikdymus astronomai prancūzas Urbenas Leverje (*U. J. Le Verrier*) ir anglas Džonas Adamsas (*J. C. Adams*) apskaičiavo hipotetinės planetos orbitą ir nustatė dangaus vietą, kurioje jos reikia ieškoti. Planeta iš tikrųjų buvo pastebėta. Ją ten atrado vokiečių astronomas Johanas Galė (*J. G. Galle*) 1846 m. Dangaus mechanika triumfavo!

Devintoji Saulės sistemos planeta – Plutonas – atrasta 1930 m. Pirmasis ją pastebėjo JAV astronomas Klaidas Tombas (*C. W. Tombaugh*). Atradus Plutono orbitos aplinkoje daugiau kūnų (nors mažesnių), kai kurie astronomai ėmė abejoti jo privilegija vadintis devintąja planeta (žr. **4.13**).

2.16. SAULĖS SISTEMOS KŪNŲ MASIŲ NUSTATYMAS

Žemės masė nustatoma pagal gerai žinomą formulę:

$$m_{\check{Z}} = \frac{gR^2}{G}, \tag{2.30}$$

čia g – laisvojo kritimo ties Žemės paviršiumi pagreitis (atsižvelgiant į Žemės sukimosi įtaką); R – Žemės spindulys; G – gravitacijos konstanta. Gaunama, kad $m_{\check{Z}} = 5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg.

Patikslintas trečiasis Keplerio dėsnis leidžia Saulės ir kitų planetų, turinčių palydovų, mases palyginti su Žemės mase. Vadinasi, Žemės masės suradimas yra pirmasis etapas ieškant kitų dangaus kūnų masių. Saulės masei nustatyti (**2.28**) formulė taikoma sistemai Saulė (S)–Žemė ($\check{Z}$) ir sistemai Žemė–Mėnulis (M) (apie Mėnulio judėjimą žr. **2.20**):

$$\frac{P_{\check{Z}}^2 \left(m_S + m_{\check{Z}}\right)}{P_M^2 \left(m_{\check{Z}} + m_M\right)} = \frac{a_{\check{Z}}^3}{a_M^3}.$$

Kadangi $m_{\check{Z}} << m_S$, galima rašyti:

$$\frac{m_S}{m_{\check{Z}} + m_M} = \frac{P_M^2 a_{\check{Z}}^3}{P_{\check{Z}}^2 a_M^3}. \tag{2.31}$$

Mėnulio masė, palyginti su Žemės mase, nėra tokia maža, kad jos būtų galima nepaisyti atliekant tikslius skaičiavimus. Mėnulio masė apskaičiuojama pagal jo poveikį pačios Žemės, dirbtinių Žemės palydovų bei dirbtinių Mėnulio palydovų judėjimui. Žemė juda aplink bendrą jos ir Mėnulio masių centrą, kuris yra maždaug 4600 km nuotolyje nuo Žemės centro. Dabar laikoma, jog $m_M = m_{\check{Z}}/81{,}30$. Tada pagal (**2.31**) formulę $m_S/m_{\check{Z}} = 332946$ ($m_S \approx 2 \times 10^{30}$ kg).

Kai reikia nustatyti planetos masę, (**2.28**) formulė taikoma sistemoms planeta–jos palydovas ir Žemė–Mėnulis.

Jeigu planeta neturi natūralių ar dirbtinių palydovų, jos masė randama pagal trikdymus, kuriuos ji sukelia arti praskriejančių kūnų judėjimui (trikdymų dydis priklauso nuo trikdančiojo kūno masės). Aišku, toks masių nustatymo būdas nėra labai tikslus. Saulės sistemoje be jokio palydovo dabar tėra viena planeta – Merkurijus (Veneros masė nustatyta pagal dirbtinius jos palydovus). Merkurijaus masė įvertinta pagal jo poveikį palyginti arti pralekiančių asteroidų, kometų ir erdvėlaivių orbitoms.

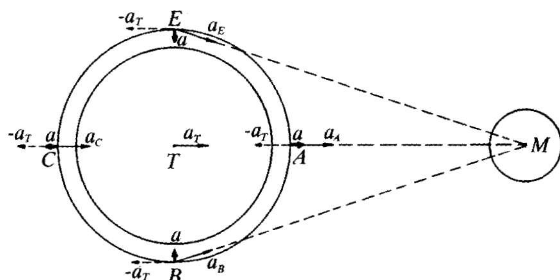
2.17. POTVYNIAI IR ATOSLŪGIAI

Įvairūs Žemės taškai yra skirtingai nutolę nuo Mėnulio centro, ir skiriasi kryptys į jį žiūrint iš tų taškų. Atitinkamai skirtingus Žemės taškus Mėnulis traukia skirtingo dydžio ir skirtingos krypties jėga. Taip atsiranda trikdančiosios jėgos, kurios šiek tiek deformuoja Žemės paviršių. Tai geriausiai iliustruoja potvyniai ir atoslūgiai, vykstantys jūrose ir vandenynuose.

Sakykime, vandens sluoksnis gaubia visą Žemę. Įvairios vandens dalelės, nevienodai traukiamos Mėnulio, įgauna nevienodus pagreičius, skirtingus nuo Žemės centro pagreičio. Vandens dalelės A (**2.20** pav.), esančios arčiausiai Mėnulio, pagreitis Žemės centro T atžvilgiu (***potvyninis pagreitis***)

$$a = a_A - a_T = G\frac{m_M}{(r_M - R)^2} - G\frac{m_M}{r_M^2} \approx Gm_M\frac{2R}{r_M^3}; \qquad (\mathbf{2.32})$$

čia a_A – dalelės A pagreitis; a_T – Žemės centro pagreitis; m_M – Mėnulio masė; r_M – atstumas tarp Žemės ir Mėnulio centrų; R – Žemės spindulys (priimta, kad $R << r_M$). Šios vandens dalelės M potvyninis pagreitis nukreiptas nuo Žemės centro į išorę. Į išorę taip pat nukreiptas ir dalelės C, esančios priešingoje Žemės pusėje, potvyninis pagreitis (jo dydį taip pat nusako (**2.32**) formulė). Vandens dalelių B ir E, esančių 90° atstumu nuo dalelių A ir C, potvyniniai pagreičiai, kaip matyti iš **2.20** pav., yra nukreipti maždaug į Žemės centrą. Todėl vandens paviršius įgauna elipsoido, ištempto Mėnulio kryptimi, pavidalą,



2.20 pav. *Potvyniniai pagreičiai*

t. y. dalelių A ir C aplinkoje vandens lygis pakyla (**potvynis**), o dalelių B ir E aplinkoje – nukrinta (**atoslūgis**).

Žemei sukantis apie ašį, potvynio bangos persikelia į vis naujas ir naujas Žemės paviršiaus vietas. Teoriškai potvyniai turi vykti ten, kur tuo momentu Mėnulis yra viršutinėje arba apatinėje kulminacijoje. Praktiškai – dėl potvynio bangų sąveikos su jūrų dugnu ir krantais (trinties) potvynių laikas nesutampa su Mėnulio kulminacijomis, bet vėluoja (kai kur net šešiomis valandomis). Potvyniai arba atoslūgiai pasikartoja vidutiniškai kas 12^h26^m, nes tiek laiko praeina tarp viršutinės ir apatinės Mėnulio kulminacijų.

Pagal (**2.32**) formulę potvyninis pagreitis (potvyninė jėga) yra atvirkščiai proporcingas atstumo tarp sąveikaujančių kūnų kubui. Todėl nenuostabu, kad potvyniniai pagreičiai, kuriuos Žemės taškams suteikia Mėnulis, 2,2 karto didesni už potvyninius pagreičius, sukeltus masyvios, bet tolimos Saulės traukos (tuo galima įsitikinti (**2.32**) formulę pritaikius Saulei ir prisiminus, kad Saulės masė $m_S = 2{,}7 \cdot 10^7\, m_M$, o atstumas $r_S = 390\, r_M$). Praktiškai Saulės sukeltų potvynių atskirai nematome, o juntama tiktai jų įtaka Mėnulio sukeltiems potvyniams. Didžiausi potvyniai būna tada, kai Mėnulis ir Saulė kulminuoja kartu (Mėnulio jaunaties ir pilnaties laikotarpiais), o mažiausi – kai regimasis atstumas tarp jų yra 90° (tada Mėnulio ir Saulės veikimas yra priešingų krypčių).

Potvynių aukštis vandenynuose, toli nuo krantų, būna apie 1 m. Pakrantėse potvyniai sustiprėja, o kai kuriose įlankose potvynių aukštis pasiekia 10–18 m. Vidinėse, pavyzdžiui, Baltijos, jūrose potvyniai pasireiškia labai silpnai. Kelių dešimčių centimetrų svyravimus patiria ir Žemės pluta. Būna ir Žemės atmosferos potvyniai.

Trintis, lydinti potvynių ir atoslūgių reiškinį, lėtina Žemės sukimąsi.

2.18. ŽEMĖS AŠIES PRECESIJA IR NUTACIJA

Labai supaprastintai paplokščią Žemę galima vaizduoti kaip sferą, kurią ties pusiauju qq' juosia didelės masės žiedas (**2.21** pav.). Mėnulis ir Saulė (**2.21** pav. dešinėje – neparodyti) artimesnę šio žiedo dalį traukia didesne jėga negu priešingą dalį ($F_1 > F_2$). Dėl šių jėgų skirtumo Žemės pusiaujo plokštuma stengiasi pasisukti ekliptikos (Žemės orbitos) plokštumos EE' link (Mėnulio orbitos plokštuma yra artima ekliptikos plokštumai – žr. **2.20**). Tačiau taip neatsitinka, nes Žemė sukasi apie savo ašį. Besisukančios Žemės ašis pp', veikiama minėto jėgų skirtumo, išlaiko savo posvyrio į ekliptikos plokštumą kampą, lygų maždaug 66°,5, tačiau, kaip pakrypęs vilkelis, brėžia erdvėje aplink ekliptikos ašį $\Pi\Pi'$ kūgio paviršių. Žemės ašies, o kartu ir dangaus ašies PP', ***precesijos*** periodas lygus maždaug 26 000 metų. Kaip potvyniams (žr. **2.17**), taip ir Žemės ašies precesijai didesnės įtakos turi Mėnulis, o ne Saulė.

Mėnulio ir Saulės padėtis Žemės (dangaus) pusiaujo plokštumos atžvilgiu

nuolatos kinta, todėl kinta ir precesinių jėgų, veikiančių Žemės sukimosi ašį, dydis ir kryptis. Šių jėgų kitimas sukelia mažus Žemės sukimosi ašies svyravimus apie vidutinę padėtį. Tokie svyravimai vadinami Žemės ašies ***nutacija*** (lot. *nutatio* – svyravimas). Ypač išsiskiria 9″,20 amplitudės ir 18,61 metų periodo svyravimas, kuris aiškiai susijęs su Mėnulio orbitos mazgų padėties kitimu (žr. **2.20**).

Silpna tolimų planetų trauka neturi poveikio Žemės ašies precesijai, tačiau dėl planetų įtakos labai lėtai ir nedaug svyruoja pati Žemės orbitos plokštuma, ir atitinkamai keičiasi kampas tarp ekliptikos ir Žemės pusiaujo plokštumų. Šis reiškinys vadinamas ***planetine precesija***. Dėl Žemės ašies precesijos dangaus poliai žvaigždėtojo dangaus fone brėžtų apie ekliptikos polius maždaug 23°,5 spindulio apskritimus (dėl nutacijos truputį vingiuotus), tačiau dėl planetinės precesijos šiek tiek kinta ekliptikos polių padėtis, ir dangaus poliai brėžiami neuždara kreive (**2.22** pav.).

2.21 pav. *Žemės ašies precesija*

Keičiantis dangaus ašies krypčiai, keičiasi ir jai statmenos plokštumos – dangaus pusiaujo plokštumos padėtis erdvėje. Dangaus pusiaujo ir ekliptikos susikirtimo taškai, t. y. pavasario ir rudens lygiadienio taškai, pamažu slenka ekliptika į vakarų pusę. Dėl planetinės precesijos lygiadienių taškai, atvirkščiai, slenka į rytus, tiktai daug lėčiau negu pirmuoju atveju į vakarus. Apskritai šiuolaikinėje epochoje per metus lygiadienių taškai pasislenka ekliptika į vakarus 50″,29. Tai ***bendroji metinė precesija***.

Lygiadienių taškai, bėgant tūkstantmečiams, pereina iš vieno žvaigždyno į kitą, o po maždaug 26 000 (360°:50″,29) metų pradeda sukti naują ratą. Lygiadienių taškai, slinkdami ekliptika į vakarus, pasitinka Saulę, judančią ekliptka į rytus. Saulė šiuose taškuose atsiduria kasmet vis anksčiau negu tuo atveju, jei nebūtų precesijos reiškinio (iš čia ir kilo pavadinimas „precesija“, lotyniškai reiškiantis „ėjimą priekyje“, o nagrinėjamuoju atveju – „lygiadienių ankstėjimą“). Pirmasis precesiją aptiko senovės graikų astronomas Hiparchas (*Hipparchos*), gyvenęs II a. pr. Kristų.

2.22 pav. *Šiaurinio dangaus poliaus precesinis judėjimas. Skaičiai reiškia metus*

Precesija pamažu keičia šviesulių pusiaujines ir ekliptines koordinates, nes dėl jos kinta dangaus sferos taškų ir apskritimų, nuo kurių atskaitomos koordinatės, padėtis žvaigždžių atžvilgiu. Palaipsniui keičiasi žvaigždėtojo dangaus vaizdas, matomas iš tam tikros Žemės paviršiaus vietos, atrodo, jog dangus sukasi apie ekliptikos ašį. Ilgainiui vieni žvaigždynai nebepakyla virš horizonto, o jų vietoje pasirodo kiti, anksčiau nematyti. Štai, pavyzdžiui, po 13 000 metų mūsų ainiai nebegalės stebėti gražaus Oriono (Šienpjovių) žvaigždyno, bet matys įspūdingą Kryžiaus žvaigždyną, kuris dabar slepiasi giliai po horizontu. Tuo metu arti šiaurinio dangaus poliaus spindės Vega (Lyros α), o Šiaurinė bus nutolusi nuo jo maždaug per 50° ir nebeatitiks savo vardo.

2.19. REGIMASIS MĖNULIO JUDĖJIMAS IR JO FAZĖS

Jau per valandą kitą galima įsitikinti, jog Mėnulis juda žvaigždžių atžvilgiu iš vakarų į rytus. Per parą jis paslenka vidutiniškai 13°,2, dėl to kiekvieną tolesnę parą pateka (arba nusileidžia) maždaug 50 min. vėliau. Visą ratą danguje žvaigždžių atžvilgiu Mėnulis padaro vidutiniškai per 27,32 vid. saulinės paros. Šis laiko tarpas vadinamas ***žvaigždiniu***, arba ***sideriniu, mėnesiu***. Mėnulio regimojo judėjimo takas eina Zodiako žvaigždynais arti ekliptikos ir kerta ją dviejuose diametraliai priešinguose taškuose.

Mėnulio judėjimą žvaigždėtajame danguje lydi jo fazės (regimojo pavidalo) kitimas. Skaitmeniškai fazė (Φ) nusakoma regimosios Mėnulio skritulio dalies didžiausio pločio ir skritulio skersmens santykiu: ji kinta nuo 0 iki 1. Skiriamos keturios pagrindinės Mėnulio fazės: ***jaunatis***, ***priešpilnis***, ***pilnatis*** ir ***delčia***. Fazė priklauso nuo Mėnulio padėties dangaus sferoje Saulės atžvilgiu. Kai Mėnulis yra jungtyje su Saule (žr. **2.1**), jo visai nematyti. Tai – jaunatis ($\Phi = 0$). Po poros dienų vakarais vakarų danguje pasirodo siauras, į dešinę išlenktas Mėnulio pjautuvas. Per kitas penkias paras Mėnulio pjautuvas išauga į pusskritulį – stoja priešpilnio fazė ($\Phi = 0{,}5$). Dabar Mėnulis yra rytų kvadratūroje ir matomas iki vidurio nakties. Dar po kokios savaitės Mėnulis jau yra opozicijoje ir visu savo skrituliu šviečia visą naktį – tai pilnatis ($\Phi = 1$). Po pilnaties dešinysis Mėnulio šonas pradeda dilti, o kai Mėnulis pasiekia vakarų kvadratūrą, belieka kairysis pusskritulis. Šioje fazėje – delčioje ($\Phi = 0{,}5$) – Mėnulis matomas po vidurnakčio. Toliau Mėnulis vis labiau panašėja į siaurą pjautuvą, šįsyk išlenktą į kairę, ir, artėjant kitai jungčiai, dingsta ryto aušroje. Nuo pilnaties iki jaunaties praeina 14–15 parų.

Ta pati Mėnulio fazė pasikartoja vidutiniškai po 29,53 vid. saulinės paros. Šis periodas vadinamas ***sinodiniu mėnesiu***. Jis, kaip matyti, yra ilgesnis už siderinį mėnesį. Taip yra todėl, kad sinodinis mėnuo – tai laiko tarpas, per kurį Mėnulis užima tą pačią padėtį Saulės (o ne žvaigždžių!) atžvilgiu, o juk Saulė

taip pat pamažu slenka į rytus. Sąryšis tarp sinodinio ir siderinio mėnesių matyti iš (**2.2**) formulės (šiuo atveju joje: *P* – žvaigždinis mėnuo, *T* – žvaigždiniai metai, *S* – sinodinis mėnuo).

Mėnulio jaunatis (jungtis) ir pilnatis (opozicija) vadinami ***sizigijomis*** (gr. *syzygia* – jungtis). Per sizigijas būna didžiausi jūrų potvyniai (žr. **2.17**).

2.20. TIKRASIS MĖNULIO JUDĖJIMAS

Regimasis Mėnulio judėjimas tarp žvaigždžių atspindi tikrąjį jo judėjimą aplink Žemę iš vakarų į rytus. Žvaigždinis mėnuo – tai Mėnulio apskriejimo aplink Žemę periodas. Mėnulio takas danguje – tai jo orbitos plokštumos susikirtimo su dangaus sfera linija. Taškai, kuriuose susikerta Mėnulio takas ir ekliptika, vadinami Mėnulio orbitos ***mazgais***. Kartu tai taškai, kuriuos jungia Mėnulio orbitos ir Žemės orbitos (ekliptikos) plokštumų susikirtimo linija – ***mazgų linija***. Vienas mazgas vadinamas ***kilimo***, o kitas – ***leidimosi*** mazgu (žr. **2.5**).

Galima sakyti, kad Mėnulis skrieja aplink Žemę elipsine orbita, bet tokia, kurios elementai (analogiški planetų orbitų elementams (žr. **2.5**) nuolat kinta. Mėnulio (Žemės palydovo) orbitos taškas, esantis arčiausiai Žemės, vadinamas ***perigėjumi*** (gr. *peri* – prie + *ge* – žemė), o labiausiai nutolęs – ***apogėjumi*** (gr. *apogeios* – nutolęs nuo Žemės). Smarkiausiai Mėnulio judėjimą trikdo Saulė ir daug mažiau – planetos bei Žemės paplokštumas.

Periodinius trikdymus (jų yra šimtai) patiria visi Mėnulio orbitos elementai. Štai įvairiu metu Mėnulio orbitos plokštumos posvyris į ekliptikos plokštumą gali skirtis 20′, orbitos ekscentricitetas *e* – 0,025, orbitos didysis pusašis *a* – 5500 km. Vidutinės minėtų Mėnulio orbitos elementų reikšmės yra tokios: $i = 5°9'$, $e = 0{,}055$, $a = 384400$ km. Vidutinis Mėnulio orbitos perigėjaus atstumas lygus 363300 km, o apogėjaus – 405 500 km, tačiau apskritai dėl orbitos trikdymų atstumas tarp Žemės ir Mėnulio kinta nuo 356 400 iki 406 700 km.

Mėnulio orbitos perigėjaus argumentas ω ir kilimo mazgo ilguma Ω, be periodinių trikdymų, patiria dar ir šimtmetinius trikdymus. Orbitos perigėjus juda (orbita sukasi savo plokštumoje) rytų kryptimi ir apsisuka per 8,85 metų (3232 paras). Pati Mėnulio orbitos plokštuma precesuoja apie ekliptikos ašį, mazgų linija sukasi iš rytų į vakarus ir į tą pačią padėtį grįžta po 18,61 metų (6797 parų). Aišku, per tą patį periodą orbitos mazgai apibėga visą ekliptiką: per žvaigždinį mėnesį mazgai paslenka maždaug 1°,5. Kadangi mazgai slenka į vakarus, t. y. priešinga Mėnulio judėjimui kryptimi, tai Mėnulis į tą patį mazgą grįžta dar nepraėjus žvaigždiniam mėnesiui. Tai įvyksta vidutiniškai po 27,21 vid. saulinės paros. Šis laiko tarpas vadinamas ***drakoniškuoju mėnesiu***.

Dėl orbitos plokštumos sukimosi Mėnulis naują ratą danguje kaskart suka nauju taku ir tik po 18,61 metų vėl užima pirmykštę padėtį. Dėl to kinta Mėnulio

matomumo virš tam tikros vietovės horizonto sąlygos. Nesunku įsitikinti, kad tuo metu, kada Mėnulio orbitos kilimo mazgas atslenka į pavasario lygiadienio tašką, Mėnulio deklinacija per žvaigždinį mėnesį kinta nuo $+28°35'$ $(23°26' + 5°9')$ iki $-28°35'$, o kada pavasario lygiadienio taškas sutampa su leidimosi mazgu, Mėnulio deklinacijos kitimo ribos susiaurėja iki $\pm 18°17'$ $(23°26' - 5°9')$.

Mėnulis yra apvalus tamsus kūnas. Vieną jo pusrutulį apšviečia Saulė, o kitas yra nematomas. Mėnuliui skriejant aplink Žemę, tolydžio kinta jo apšviestosios pusės matymo sąlygos, stebimas Mėnulio fazių kitimas. Linija, skirianti apšviestąją Mėnulio skritulio dalį nuo tamsiosios, vadinama ***terminatoriumi*** (lot. *terminator* – atribotojas).

Mėnulio apsisukimo apie ašį periodas lygus jo apskriejimo aplink Žemę periodui. Vadinasi, jeigu Mėnulis skrietų apskritimine orbita, jeigu jo sukimosi ašis būtų statmena orbitos plokštumai ir jeigu jis būtų labai toli (ar Žemė labai maža), nuo Žemės būtų visą laiką matomas griežtai tas pats Mėnulio pusrutulis. Tačiau minėtų „jeigu“ nėra. Mėnulis apie ašį sukasi tolygiai, o elipsine orbita skrieja netolygiai. Pavyzdžiui, per ketvirtį periodo po perigėjaus perėjimo Mėnulis nuskrieja daugiau negu ketvirtį kelio (ties perigėjumi kūnai juda greičiausiai), o apie ašį pasisuka tiksliai 90°. Dėl tokio nesutapimo stebėtojui atrodo, jog Mėnulis tarsi truputį pasisuko ir išniro perigėjuje nematyta Mėnulio paviršiaus dalis. Stebint Mėnulį ištisą mėnesį, atrodo, jog jis per tą laiką vieną sykį susvyravo. Mėnulio sukimosi ašis yra pasvirusi į jo orbitos plokštumą vidutiniškai $83°21'$ kampu. Ši ašis išlaiko kryptį erdvėje, ir dėl to į Žemę dalį mėnesio būna atgręžtas vieno Mėnulio ašigalio rajonas, o kitą dalį mėnesio – kito ašigalio rajonas. Ir vėl susidaro įspūdis, kad Mėnulis krypuoja tik dabar kita kryptimi. Minėti regimieji periodiniai Mėnulio svyravimai vadinami ***optine libracija*** (lot. *libratio* – svyravimas). Kadangi Mėnulis yra palyginti arti, tai iš įvairių Žemės vietų matyti šiek tiek skirtingos Mėnulio pusės. Tai ***parinė***, arba ***paralaksinė, libracija***. Dėl visų tipų libracijos iš Žemės galima apžvelgti 59% (o ne 50%) Mėnulio paviršiaus. Be tariamų lingavimų Mėnulis rodo ir realius svyravimus apie masės centrą (***fizinė libracija***), tačiau jų amplitudė labai maža (2″).

Mėnulio vidutinis orbitinis greitis lygus 1,02 km/s.

2.21. SAULĖS IR MĖNULIO UŽTEMIMAI

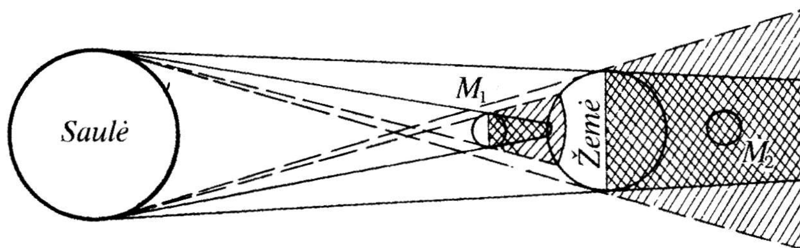
Mėnulis trumpam uždengia tolimus dangaus šviesulius, kurie patenka į jo judėjimo taką. Kartais taip atsitinka ir su Saule. Kai Mėnulis uždengia visą Saulės skritulį, sakoma, jog vyksta ***visiškas Saulės užtemimas***, o kai tik dalį – ***dalinis Saulės užtemimas***. Kitais žodžiais tariant, visiškas Saulės užtemimas būna tose Žemės paviršiaus vietose, į kurias krinta Mėnulio šešėlis, o dalinis – ten, kur krinta pusšešėlis (**2.23** pav., padėtis M_1). Mėnulio šešėlio ir pusšešėlio

Žemėje dydis priklauso nuo Mėnulio, Žemės ir Saulės tarpusavio atstumo: šešėlio skersmuo dažniausiai būna 40–100 km ir tiktai labai retai – 270 km (Mėnulis perigėjuje). Pastaruoju atveju Mėnulio pusšešėlio Žemėje skersmuo lygus 6750 km. Būna taip, kad Mėnulio šešėlio kūgis visiškai nepasiekia Žemės (Mėnulis apogėjuje). Tąsyk stebėtojas, esąs arti šešėlio kūgio ašies, mato ***žiedinį Saulės užtemimą*** (sumažėjęs Mėnulio skritulys nepajėgia uždengti visos Saulės).

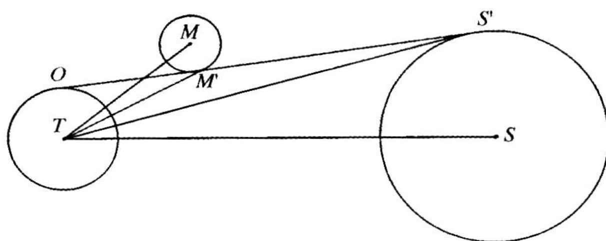
Dėl Mėnulio skriejimo aplink Žemę ir Žemės sukimosi apie savo ašį Mėnulio šešėlis 0,5–1 km/s greičiu bėga Žemės paviršiumi maždaug iš vakarų į rytus brėždamas siaurą kelių tūkstančių kilometrų ilgio visiško Saulės užtemimo juostą. Abipus šios juostos matomas dalinis Saulės užtemimas. Daliniu užtemimu taip pat prasideda ir baigiasi visiškas (ir žiedinis) Saulės užtemimas. Visa Saulės užtemimo eiga toje pat Žemės vietoje (skirtingose vietose užtemimas prasideda skirtingu laiku) gali užtrukti daugiau kaip dvi valandas, tačiau visiškas užtemimas paprastai trunka tiktai 2–3 minutes ir labai retai – 7,5 minutes. Saulė užtemti pradeda nuo dešiniojo (vakarinio) krašto. Tam tikru momentu užtemimas kiekybiškai apibūdinamas ***faze***, t. y. uždengtos Saulės skritulio skersmens dalies santykiu su visu skersmeniu.

Mėnulio užtemimas (***dalinis*** ar ***visiškas***) vyksta tada, kai jo dalis arba jis visas panyra į Žemės šešėlio kūgį (**2.23** pav.; padėtis M_2). Prieš ir po užtemimo Mėnulis kurį laiką skrieja Žemės pusšešėlio kūgyje, tačiau ***pusšešėlinio užtemimo*** mūsų akys nejaučia. Žemės šešėlio kūgio skersmuo ties Mėnulio orbita maždaug 2,5 karto didesnis už Mėnulio skersmenį, todėl visiškas Mėnulio užtemimas gali trukti beveik dvi valandas, o visos užtemimo fazės – beveik 4 valandas. Mėnulio užtemimas prasideda nuo kairiojo jo šono. Visiško užtemimo metu Mėnulį silpnai apšviečia Saulės spinduliai, užlinkę Žemės atmosferoje, ir jį galima matyti.

Savaime aišku, kad Saulės užtemimas gali vykti tik Mėnuliui esant jaunaties, o Mėnulio užtemimai – tik pilnaties fazėje. Tačiau toli gražu ne per kiekvieną jaunatį ir pilnatį vyksta užtemimas. Kai šios fazės pasitaiko toli nuo Mėnulio orbitos mazgų, Mėnulis aplenkia Saulę ar Žemės šešėlio kūgį būdamas virš jų ar po jais, ir užtemimo nėra. Nesunku įrodyti, kad jaunatyje Mėnulio skritulys



2.23 pav. *Saulės ir Mėnulio (M) užtemimo schema*



2.24 pav. *Saulės užtemimo pasirodymo sąlyga*

būtinai kliudys Saulės skritulį, jeigu jo centras yra ne toliau kaip 16°,5 į vieną ir kitą pusę nuo Mėnulio orbitos mazgo. **2.24** pav. parodytos Saulės (S), Mėnulio (M) ir Žemės (T) padėtys tuo atveju, kai Saulės užtemimo dar nėra, bet Mėnulio skritulys stebėtojui, esančiam Žemės paviršiaus taške O, jau paliečia Saulės skritulį. Šiuo momentu Mėnulio geocentrinė ekliptinė platuma

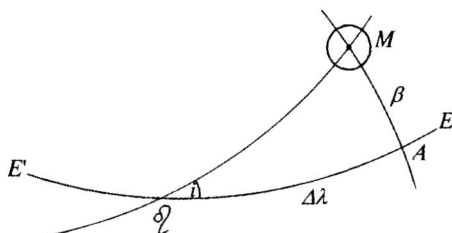
$$\beta = \angle MTS = \angle MTM' + \angle M'TS' + \angle S'TS =$$
$$= \angle MTM' + \angle OM'T - \angle OS'T + \angle S'TS =$$
$$= \rho_M + p_M - p_S + \rho_S,$$

čia, kaip matyti, ρ_M – Mėnulio skritulio spindulys; ρ_S – Saulės skritulio spindulys; p_M – Mėnulio horizontinis paralaksas (kampas, kuriuo iš Mėnulio matomas Žemės spindulys) ir p_S – Saulės horizontinis paralaksas. Imant vidutines šių dydžių reikšmes, β = 88′,7 (15′,5 + 57′,0 – 0′,1 + 16′,3). Kai Mėnulio skritulio centras yra nors šiek tiek arčiau ekliptikos negu ši reikšmė, Žemės taške O jau vyksta dalinis Saulės užtemimas. Žinant ekliptinę platumą β, nesunku rasti Mėnulio ilgumą $\Delta\lambda$ jo orbitos mazgo atžvilgiu. Būtent pagal statųjį sferinį trikampį ☊AM (**2.25** pav.)

$$\sin \Delta\lambda = \operatorname{tg} \beta \operatorname{ctg} i,$$

čia i = 5°9′ – Mėnulio tako danguje posvyris į ekliptiką. Jeigu β = 88′,7, tai $\Delta\lambda$ = 16°,5. Tai ir yra jau minėta riba, nuo kurios prasideda Saulės užtemimai.

Panašiai galima įrodyti, kad pilnatyje Mėnulis būtinai bent prisilies prie Žemės šešėlio kūgio, jeigu jo ašis kerta ekliptiką ne toliau 10°,5 nuo mazgo. Dabar ribinis $\beta = \rho_M + \rho_š$, čia $\rho_š$ – Žemės šešėlio spindulys Mėnulio orbitos atstumu (vidutiniškai $\rho_š$ = 41′).



2.25 pav. *Sferinis trikampis Mėnulio padėčiai jo orbitos mazgo atžvilgiu apskaičiuoti*

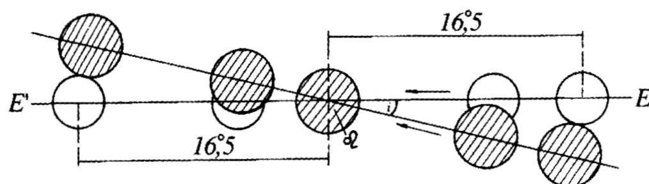
Saulės užtemimų zoną, t. y. ekliptikos dalį, kurioje gali vykti Saulės užtemimai ir kurios ilgis yra 33° (**2.26** pav.), Saulė pereina per 32 paras. Per šį laiką būtinai įvyksta vienas, o kartais ir du Saulės užtemimai, nes Mėnulio jaunatis pasikartoja kas 29,53

paros (sinodinis mėnuo). Maždaug po pusės metų, kai Saulė priartėja prie kito Mėnulio orbitos mazgo, prasideda naujas užtemimų sezonas. Jeigu vienas užtemimų sezonas sutampa su metų pradžia, tai trečiasis iš eilės sezonas prasideda dar nepasibaigus metams, nes Mėnulio orbitos mazgams (užtemimų zonoms) slenkant į vakarus (žr. **2.20**) užtemimų sezonai kasmet užskuba maždaug 20 parų. Taigi per metus gali būti nuo dviejų iki penkių Saulės užtemimų. Laiko tarpas, per kurį Saulė grįžta prie to paties Mėnulio orbitos mazgo, vadinamas ***drakoniškaisiais metais***. Jie turi 346,62 vid. saulinės paros.

Žemės šešėlio kūgis Mėnulio užtemimų zoną, lygią 21°, pereina per 20 parų. Per šį laiką, trumpesnį už sinodinį mėnesį, gali pasitaikyti tik viena Mėnulio pilnatis, bet gali ir visai jos nebūti. Vadinasi, per metus gali būti du trys Mėnulio užtemimai (trys, kai pirmasis užtemimas įvyksta sausio pradžioje), bet gali ir nebūti nė vieno.

Apskritai per metus daugiausia gali įvykti 7 užtemimai (5 Saulės ir 2 Mėnulio arba 4 Saulės ir 3 Mėnulio), o mažiausiai – 2 (abu Saulės). Dažniausiai būna 2 Saulės ir 2 Mėnulio užtemimai. Įspūdis, kad Mėnulio užtemimų yra daugiau, atsiranda dėl to, kad Mėnulio užtemimas matomas visame Žemės pusrutulyje, atsuktame į jį, o Saulės užtemimas – tiktai palyginti siauroje juostoje. Toje pačioje Žemės paviršiaus vietoje daliniai Saulės užtemimai būna kas 2–3 metai, o visiški – kas 200–300 metų.

Po 18 metų ir 11,32 paros, arba 223 sinodinių mėnesių, užtemimų tvarka pradeda kartotis, nes, praėjus šiam laikui, pradeda kartotis Saulės, Mėnulio ir jo orbitos mazgų tarpusavio padėtis. Tiesa, naujojo ir ankstesniojo ciklų atitinkami užtemimai vyksta nevisiškai vienodu atstumu nuo Mėnulio orbitos mazgų (223 sinodiniai mėnesiai nėra tiksliai lygūs 242 drakoniškiesiems mėnesiams, o skiriasi 0,04 paros) ir todėl nekopijuoja vienas kito. Be to, naujojo ciklo užtemimai matomi labiau į vakarus, nes užtemimai pasikartoja ne po sveikojo parų skaičiaus (per 0,32 paros Žemė pasisuka maždaug 120°). Minėtas užtemimų tvarkos kartojimosi periodas vadinamas ***saru*** (egiptietiškas žodis, reiškiąs „pasikartojimą“). Per sarą būna vidutiniškai 71 užtemimas: 43 Saulės ir 28 Mėnulio. XX a. Žemės rutulyje įvyko 74 visiški Saulės užtemimai. Du buvo matomi Lietuvoje: 1914 m. rugpjūčio 21 d. (šiaurinėje šalies dalyje) ir 1954 m. birželio 30 d. (pietinėje dalyje). Kitas visiškas Saulės užtemimas Lietuvos teritorijoje bus matomas 2075 m. liepos 13 d.



2.26 pav. *Saulės užtemimų zona*

2.22. DIRBTINIŲ ŽEMĖS PALYDOVŲ JUDĖJIMAS

Dirbtinį Žemės palydovą (DŽP) iškelia ir suteikia jam greitį daugiapakopė raketa. Palydovo paleidimo vieta ir laikas, taip pat paleidimo greičio dydis bei kryptis lemia orbitą, kuria DŽP skrieja toliau paklusdamas dangaus mechanikos dėsniams. Tiktai kartais DŽP orbita gali būti apskritimas, o šiaip palydovai skrieja elipsėmis, kurių viename židinyje yra Žemės centras. DŽP orbitos elementai yra tokie (palyginkime su **2.5**): orbitos plokštumos posvyris į Žemės (dangaus) pusiaujo plokštumą i, kilimo mazgo (dangaus pusiaujo taško, kuriame palydovas pereina į šiaurinę dangaus pusę) rektascensija Ω, perigėjaus nuotolis nuo kilimo mazgo ω, orbitos didysis pusašis a, jos ekscentricitetas e ir palydovo perėjimo per perigėjų momentas τ.

DŽP orbitos didysis pusašis priklauso nuo pradinio greičio dydžio (žr. (**2.23**) formulę), o ekscentricitetas – dar ir nuo jo krypties. Palydovas skrietų apskritimine orbita, jeigu jis būtų paleistas tiksliai horizontalia kryptimi, o jo greitis tiksliai atitiktų apskaičiuotą reikšmę. Palydovo apskritiminį greitį galima rasti iš (**2.24**) formulės. Būtent:

$$v_a = \sqrt{\frac{Gm_{\check{Z}}}{R+h}},$$

čia $m_{\check{Z}}$ – Žemės masė (DŽP masė $m << m_{\check{Z}}$); R – Žemės spindulys; h – palydovo paleidimo aukštis. Šią formulę, turint omenyje, kad sunkio jėgos pagreitis ties Žemės paviršiumi $g = Gm_{\check{Z}}/R^2$, galima parašyti kitaip:

$$v_a = \sqrt{\frac{gR^2}{R+h}}. \qquad (\mathbf{2.33})$$

Apskritiminis greitis, palydovo paleidimo taškui artėjant prie Žemės, didėja. Prie pat Žemės (h = 0) $v_a = v_{1k}$ = 7,91 km/s. Greitis v_{1k} vadinamas ***pirmuoju kosminiu greičiu* Žemės atžvilgiu**. Tai yra mažiausias greitis, kai kūnas jau gali tapti Žemės palydovu, skriejančiu prie pat jos paviršiaus. Realiai DŽP gali egzistuoti tik labai retoje atmosferoje (h > 150 km).

Kai palydovas leidžiamas horizontalia kryptimi ir jo pradinis greitis $v < v_a$, paleidimo taškas tampa palydovo orbitos apogėjumi, o kai $v > v_a$ – perigėjumi.

DŽP apskriejimo aplink Žemę periodą nusako trečiasis apibendrintasis Keplerio dėsnis (žr. **2.13**):

$$P = \frac{2\pi}{\sqrt{Gm_{\check{Z}}}} a^{3/2} = \frac{2\pi}{R\sqrt{g}} a^{3/2}. \qquad (\mathbf{2.34})$$

Palydovas, skriejantis vidutiniškai 300 km aukštyje ($a = R$ + 300), Žemę aplekia per 1,5 val. Kitas įdomus pavyzdys – palydovas, skriejantis iš vakarų į rytus Žemės pusiaujo plokštumoje apskritimine 35810 km aukščio orbita.

Tokį DŽP stebėtojas mato tarsi pakibusį vienoje vietoje, nes jo skriejimo kampinis greitis yra lygus Žemės sukimosi kampiniam greičiui (apskriejimo periodas lygus žvaigždinei parai). Palydovai su šitokia orbita vadinami ***stacionariaisiais***.

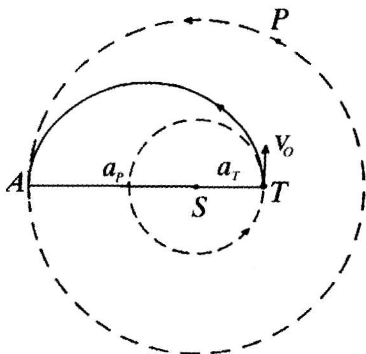
Čia buvo aprašytas supaprastintas DŽP judėjimas, atitinkantis dviejų kūnų (sferiškai simetrinė planeta – palydovas) uždavinį. Iš tikrųjų palydovo judėjimas yra gerokai sudėtingesnis, veikiamas trikdymų. Žemas DŽP orbitas labiausiai trikdo Žemės paplokštumas (nesimetriškas traukos laukas) ir atmosferos pasipriešinimas, o aukštas – Mėnulio ir Saulės trauka. Dėl Žemės nesferiškumo palydovo orbita sukasi savo plokštumoje (kinta perigėjaus kampinis nuotolis nuo kilimo mazgo ω), o pati ši plokštuma sukasi apie Žemės ašį (kinta kilimo mazgo rektascensija Ω). Dėl oro pasipriešinimo (stabdymo) DŽP orbita mažėja ir apvalėja (mažėja orbitos didysis pusašis a ir ekscentricitetas e). Nepaisant stabdymo, artėjant prie Žemės, palydovo greitis didėja, nes mažėja jo potencinė energija. Pagaliau palydovas įlekia į tankesnius atmosferos sluoksnius ir dėl trinties užsidega. Minėtus šimtmetinius DŽP orbitos elementų trikdymus lydi įvairios kilmės periodiniai trikdymai.

Pirmasis pasaulyje DŽP buvo paleistas 1957 m. spalio 4 d. tuometinėje Sovietų Sąjungoje.

2.23. TARPPLANETINIŲ ERDVĖLAIVIŲ JUDĖJIMAS

Kad erdvėlaivis patektų i tarpplanetinę erdvę, jam reikia suteikti parabolinį greitį $v_p = v_a\sqrt{2}$ (žr. **2.13**) arba dar didesnį. Ties Žemės paviršiumi parabolinis greitis $v_p = v_{2k} = v_{1k}\sqrt{2} = 11{,}19$ km/s. Toks greitis (v_{2k}) vadinamas ***antruoju kosminiu (arba pabėgimo) greičiu* Žemės atžvilgiu**. Nustojus veikti nešančiosios raketos varikliams, prasideda pasyvusis tarpplanetinio erdvėlaivio (TE) skriejimo tarpsnis, kada jis juda pagal dangaus mechanikos dėsnius. Norint labai tiksliai žinoti erdvėlaivio skriejimo trajektoriją, reikia spręsti daugelio kūnų uždavinį, t. y. atsižvelgti į stambiųjų Saulės sistemos kūnų trikdančiąją įtaką. Tačiau, planuojant tarpplanetinius skrydžius, pirmajame etape TE orbitos apskaičiuojamos paprastesniu metodu. Teigiama, kad tam tikroje erdvės dalyje aplink dangaus kūną – vadinamojoje ***kūno veikimo sferoje*** – TE judėjimą lemia tiktai to kūno trauka. Vadinasi, čia apsiribojama dviejų kūnų uždaviniu. Tokį uždavinį reikia spręsti kelis kartus, kai erdvėlaivio trajektorija kerta kelių dangaus kūnų (Žemės, Saulės, planetos) veikimo sferas, vis dėlto tai daug paprasčiau, negu nustatyti daugelio kūnų įtaką visame erdvėlaivio kelyje.

Tiksliuose skaičiavimuose kokio nors dangaus kūno veikimo sfera – tai erdvės dalis, kurioje šis kūnas daro pagrindinę (o ne vienintelę) įtaką TE judėjimui. Aišku, kalbėti apie kurio nors dangaus kūno veikimo sferą galima



2.27 pav. *Paprasčiausia TE skrydžio į išorinę planetą trajektorija*

tiktai turint omenyje kitą kūną. Įrodoma, kad masės m kūno veikimo sferos masės M kūno atžvilgiu spindulys

$$\rho = r\sqrt[5]{\frac{m^2}{M^2}}, \qquad (2.35)$$

čia r – atstumas tarp tų kūnų. Žemės veikimo sferos Saulės atžvilgiu spindulys lygus 930 000 km. Mėnulio veikimo sferos Žemės atžvilgiu spindulys – 66 000 km.

TE orbitos pavidalas dangaus kūno veikimo sferoje priklauso nuo greičio, kuriuo jis įlekia į šią sferą. Ilgiausiai erdvėlaivis išbūna Saulės traukos lauke. Mažiausiai kuro TE paleisti sunaudojama (reikalingas mažiausias pradinis greitis) tada, kai jis Saulės veikimo sferoje į planetą skrieja elipsine orbita, kuri tiktai paliečia Žemės ir tos planetos orbitas. Tokia orbita skrydžiams į išorinę planetą parodyta **2.27** pav. (čia laikoma, kad Žemės (T) bei planetos (P) orbitos yra apskritimai ir yra vienoje plokštumoje). Šiuo atveju TE paleidžiamas Žemės skriejimo kryptimi, o jo greitis v_0 Saulės atžvilgiu, išėjus iš Žemės veikimo sferos (brėžinyje nematomos), turi būti didesnis už Žemės orbitinį greitį. Tada erdvėlaivio orbitos perihelis yra ties Žemės orbita, o afelis – ties paskirties planetos orbita. Tokios orbitos didysis pusašis $a = (a_T + a_p)/2$, o ekscentricitetas $e = 1 - a_T/a$ (žr. (**2.3**) formulę). Iš (**2.6**) formulės matyti, jog TE skrydžio į planetą ekonomiškiausia trajektorija trukmė $\Delta t = \sqrt{a^3}/2$. Erdvėlaivis turi būti paleistas tokiu momentu, kad, jam pasiekus afelį A, ten atsidurtų ir planeta (**2.27** pav. parodyta planetos P padėtis maždaug atitinka TE starto momentą).

Tarpžvaigždiniams skrydžiams reikia, kad erdvėlaivis Saulės veikimo sferoje turėtų parabolinį ar didesnį greitį. Vidutiniame Žemės atstume nuo Saulės heliocentrinis parabolinis greitis $v_p = 29{,}8 \cdot \sqrt{2}$ km/s = 42,1 km/s. Erdvėlaivis, nukreiptas Žemės orbitinio judėjimo linkme, skries paraboline orbita Saulės atžvilgiu, jeigu jo greitis Žemės atžvilgiu, išeinant iš Žemės veikimo sferos, bus lygus (42,1 – 29,8) km/s = 12,3 km/s. Be šios kinetinės energijos erdvėlaivis paleidimo momentu dar turi įgauti kinetinės energijos, kuri reikalinga Žemės traukai nugalėti. Taigi pradinis geocentrinis erdvėlaivio greitis

$$v_{3k} = \sqrt{12{,}3^2 + 11{,}2^2}\ \text{km/s} = 16{,}6\ \text{km/s}.$$

Tai ***trečiasis kosminis greitis* Žemės atžvilgiu**. Reikia įsidėmėti, jog tai yra minimalus paleidimo gretis. Jeigu, pavyzdžiui, būtų bandoma erdvėlaivį leisti priešinga Žemės skriejimo kryptimi, jo pradinis greitis turėtų būti lygus

$$\sqrt{(29{,}8 + 42{,}1)^2 + 11{,}2^2}\ \text{km/s} = 72{,}8\ \text{km/s}.$$

3

SKYRIUS

ASTROFIZIKOS METODAI IR PRIETAISAI

Aloyzas Pučinskas

3.1. ASTROFIZIKAI PRIEINAMI INFORMACIJOS KANALAI

Astronomijos mokslo pagrindas – pasyvūs stebėjimai. Eksperimentinio tyrimo metodas gali būti pritaikytas tik Saulės sistemoje. Tai, kas vyksta toliau, dar ilgai, matyt, bus nustatoma tiktai pagal Žemę pasiekiančią spinduliuotę.

Pagrindinis informacijos apie tolimus dangaus objektus šaltinis yra ***elektromagnetinė spinduliuotė***. Ne visos elektromagnetinės bangos prasiskverbia pro Žemės atmosferą ir pasiekia jos paviršių. Gama, Rentgeno ir didelę dalį ultravioletinių (UV) spindulių (iki $\lambda = 0{,}3$ μm) sugeria ozono, azoto ir deguonies molekulės, taip pat azoto ir deguonies atomai. Atmosfera neskaidri ir didelei daliai infraraudonųjų (IR) spindulių. Juos efektyviausiai sugeria vandens garų ir anglies dioksido molekulės. Iki $\lambda = 20$ μm bangos ilgio tarp molekulių sugerties juostų dar yra keletas daugiau ar mažiau skaidrių vietų, o toliau juostos visiškai susilieja. Siauri skaidrumo tarpai vėl pasirodo milimetriniame diapazone, o radijo bangos nuo 1 cm iki 20 m pro Žemės atmosferą prasiskverbia netrikdomos. Ilgesnės bangos jau atsispindi nuo jonosferos. Taigi atmosfera turi du šiek tiek platesnius skaidrumo langus: **optinį** ir **radijo**. Šiose elektromagnetinio spektro srityse sukaupta daugiausia astrofizikos duomenų. Gama ir infraraudonuosius spindulius galima tirti jau iš aerostatų ir lėktuvų (30–40 km aukštyje), o Rentgeno ir ultravioletinius spindulius tiktai iš geofizinių raketų ir dirbtinių Žemės palydovų (aukščiau kaip 150 km). Apie elektromagnetinės spinduliuotės registravimo prietaisus ir imtuvus bus rašoma toliau.

Kitas informacijos apie reiškinius Visatoje šaltinis – ***kosminiai spinduliai***, t. y. labai didelės energijos protonų, helio bei sunkesniųjų elementų branduolių, elektronų srautas, krintantis į Žemę iš visų pusių. Žemės paviršių pasiekia tiktai antriniai kosminiai spinduliai, t. y. įvairios elementariosios dalelės, atsiradusios sąveikaujant kosminiams spinduliams (pirminiams) su atmosferos atomų

branduoliais. Pirminiai kosminiai spinduliai tiriami branduolio fizikos metodais iš oro balionų, dirbtinių Žemės palydovų ir tarpplanetinių erdvėlaivių.

Remiantis teorinės astrofizikos samprotavimais, konstatuojama, kad Žemę skrodžia intensyvūs kosminės kilmės ***neutrinų srautai***. Tai dar vienas informacijos kanalas astrofizikoje. Deja, neutrinai yra itin skvarbios dalelės, ir juos registruoti labai sunku.

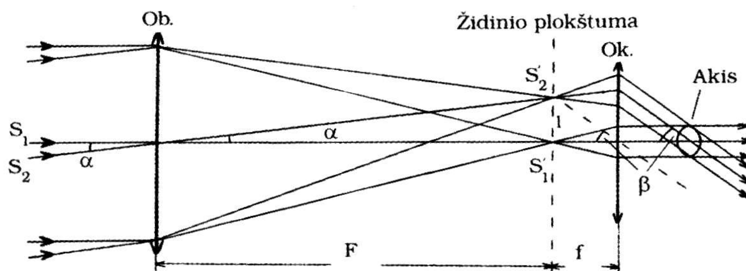
Bendroji reliatyvumo teorija teigia, kad judantys su kintamu pagreičiu kūnai (masės) spinduliuoja ***gravitacines bangas***, plintančias šviesos greičiu. Tokia banga, pasiekusi kokį nors kūną, turi sukelti mažus reliatyvius jo dalių poslinkius. Šiuo reiškiniu ir yra pagrįsti bandymai registruoti gravitacines bangas. Jų laukiama iš kosminės erdvės, nes tik ten yra objektų, kurių gravitacinė spinduliuotė turėtų būti pakankamo intensyvumo. Tačiau šis informacijos kanalas dar neteikia duomenų. Matyt, reikia didesnio jautrio gravitacinių antenų.

Saulės sistemos astronomija, kaip minėta, jau šliejasi prie eksperimentinių mokslų, nors stebėjimų vaidmuo taip pat dar didelis. ***Tarpplanetiniai erdvėlaiviai*** tiria planetas, jų palydovus bei tarpplanetinę medžiagą tais pačiais metodais, kokiais naudojasi fizikai, chemikai, geologai ir kt. Eksperimentu reikia laikyti ir Saulės sistemos kūnų ***radiolokaciją***. Pagaliau laboratorijose tiriami „dangaus akmenys“ – meteoritai bei uolienų pavyzdžiai, pargabenti iš Mėnulio.

3.2. OPTINIAI TELESKOPAI

3.2.1. Teleskopo paskirtis

Teleskopas (gr. *tele* – toli + *skopeo* – stebiu) – tai pagrindinis prietaisas dangaus kūnams stebėti. Jo paskirtis – sutelkti kuo daugiau šviesos, ateinančios iš šviesulio, ir nukreipti ją į šviesos imtuvą, sukurti teleskopo objektyvo židinio plokštumoje šviesulio (dangaus srities) atvaizdą, padidinti regėjimo kampą, t. y. išskirti akiai susiliejančius šviesulius ar jų detales. Šviesą sutelkti galima lęšiu arba įgaubtuoju veidrodžiu. Lęšinis teleskopas vadinamas ***refraktoriumi*** (lot. *refractio* – lūžimas), o veidrodinis – ***reflektoriumi*** (lot. *reflexus* – atspindys).



3.1 pav. *Teleskopo (refraktoriaus) optinė schema*

Dangaus atvaizdą teleskopo objektyvo (lęšio arba veidrodžio) židinio plokštumoje galima fotografuoti, stebėti vizualiai (akimi), tirti kitais būdais. Atliekant stebėjimus, svarbu žinoti gauto atvaizdo mastelį. Tiesinis atstumas tarp šviesulių S_1 ir S_2 atvaizdų objektyvo židinio plokštumoje S_1' ir S_2' (**3.1** pav.):

$$l = F \operatorname{tg} \alpha,$$

čia F – objektyvo židinio nuotolis, α – kampas tarp tų šviesulių. Jeigu kampas α mažas, tai

$$l = F\alpha = F\frac{\alpha^{\circ}}{57^{\circ},3} = F\frac{\alpha'}{3438'} = F\frac{\alpha''}{206265''}. \qquad (\mathbf{3.1})$$

Tada teleskopo sukurto atvaizdo (arba gautos nuotraukos) mastelis, išreikštas lanko sekundėmis į milimetrą,

$$\mu = \frac{\alpha''}{l} = \frac{206265''}{F[\mathrm{mm}]}. \qquad (\mathbf{3.2})$$

Vizualiai šviesulio atvaizdas apžiūrimas pro specialią lęšių sistemą – ***okuliarą***, kuris, kaip ir lupa, smarkiai priartina akį prie objektyvo židinio plokštumos ir leidžia matyti atvaizdą dideliu kampu. Vizualinio teleskopo kampinis didinimas

$$G = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{F}{f}, \qquad (\mathbf{3.3})$$

čia β kampas, kuriuo pro okuliarą matyti šviesuliai, f – okuliaro židinio nuotolis (žr. **3.1** pav.).

Pirmasis dangaus šviesulių stebėjimus pro teleskopą pradėjo G. Galilėjus 1609 m.

3.2.2. Teleskopo skiriamoji geba

Atrodo, kad kuo daugiau teleskopas didina, tuo glaudesnius šviesulius ar smulkesnes jų detales galima juo įžiūrėti. Deja, taip yra tik iki tam tikros ribos, o toliau daugiau didinti nėra prasmės. Didinimą riboja pati šviesos prigimtis – šviesos bangų **difrakcija** nuo teleskopo objektyvo kraštų. Taškinio šviesos šaltinio (pavyzdžiui, žvaigždės) atvaizdas objektyvo židinio plokštumoje dėl difrakcijos pavirsta šviesia dėmele, apsupta silpnėjančių žiedų. Centrinės dėmelės, kurioje sukaupta apie 84% šaltinio šviesos, kampinis spindulys (žiūrint iš objektyvo optinio centro)

$$\delta = 1{,}22\frac{\lambda}{D}\mathrm{rad} = (2{,}5 \cdot 10^{5})''\frac{\lambda}{D}, \qquad (\mathbf{3.4})$$

čia λ – šviesos bangos ilgis, D – teleskopo objektyvo skersmuo. Žmogaus akis jautriausia šviesai, kurios λ = 550 nm = $5{,}5 \cdot 10^{-5}$ cm, todėl, stebint vizualiai,

$$\delta = \frac{14''}{D[\mathrm{cm}]}.$$

Kai tarp dviejų žvaigždžių kampinis atstumas Δ yra mažesnis už 2δ, jų atvaizdai – difrakcinės dėmelės – klojasi viena ant kitos, o kai $\Delta \leq 0{,}85\delta$, t. y. kai

$$\Delta \leq \frac{12''}{D[\mathrm{cm}]}, \tag{3.5}$$

apskritai neįmanoma pasakyti (nesvarbu koks didinimas), ar tai viena žvaigždė, ar dvi. Taigi (**3.5**) formulė nusako vizualinio teleskopo teorinę ***skiriamąją gebą***. Pavyzdžiui, 100 cm teleskopas leidžia atskirai stebėti žvaigždes, jeigu kampinis atstumas tarp jų ne mažesnis kaip 0″,12. Tačiau praktiškai teleskopo, esančio Žemės paviršiuje, skiriamąją gebą lemia ne šviesos difrakcijos reiškinys, bet atmosfera. Oro turbulentinis judėjimas (kintantis ir nevienodas spindulių lūžimas) gerokai išplečia žvaigždžių atvaizdus ir atitinkamai sumažina teleskopo skiriamąją gebą. Net ir labai stabiliam orui esant metrinio teleskopo skiriamoji geba tėra apie 0,5–1″. Dangaus nuotraukose dėl šviesos sklaidos emulsijoje ir atmosferos įtakos žvaigždžių fotografiniai vaizdai išeina daug didesni už jų difrakcinius atvaizdus. Teorinę skiriamąją gebą galima pasiekti iškėlus teleskopą virš atmosferos. Be to, yra rastas būdas atmosferos turbulencijos neigiamai įtakai sumažinti (apie tai žr. toliau).

3.2.3. Teleskopo skverbties geba

Teleskopą dar apibūdina pačių silpniausių įmanomų stebėti šviesulių spindesys. Tai teleskopo ***skverbties geba***. Galimybę stebėti silpnas žvaigždes (taškinius šaltinius) lemia teleskopo objektyvo plotas. Šiuo atveju teleskopo skverbties geba proporcinga D^2. Pratisų objektų (ūkų, kometų ir t. t.) stebėjimo galimybes lemia dar ir jų atvaizdo plotas, proporcingas F^2 (žr. (**3.1**) formulę). Taigi čia teleskopo skverbties geba proporcinga santykiui D^2/F^2 arba dydžio $A = D/F$ kvadratui. Šis labai svarbus dydis vadinamas objektyvo ***santykine anga*** arba ***šviesingumu***.

Ne vien tik geometriniai teleskopo matmenys lemia jo skverbties gebą. Svarbu optikos kokybė, šviesos nuostoliai joje (refraktoriuose – tai sugertis lęšiuose ir atspindžiai nuo lęšių paviršių, reflektoriuose – nevisiškas atspindys nuo veidrodžių). Daug priklauso ir nuo šviesos imtuvų jautrio. Pagaliau skverbties gebai, kaip ir skiriamajai gebai, turi įtakos išorės veiksniai. Ją labai mažina atmosferos turbulentinis judėjimas, nes imtuvai blogai „įžiūri“ turbulencijos išblukintus silpnų žvaigždžių atvaizdus. Laimei, Žemės paviršiuje yra vietų, kur oras ramus ir vaiskus, kur žvaigždžių vaizdai palyginti maži. Tik tokiose gero astroklimato vietovėse dabar ir statomos naujos observatorijos. Neigiamos

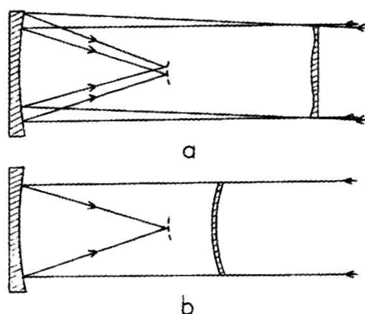
įtakos turi taip pat konvekcinės oro srovės, atsiradusios čia pat prie teleskopo, kai jo ir aplinkos temperatūros yra nevienodos. Skverbtį dar mažina dangaus fono švytėjimas bei spinduliuotės sugertis ir sklaida Žemės atmosferoje. Aišku, visiškai teleskopo potencinės galimybės gali atsiskleisti tik už atmosferos ribų, dirbtinių Žemės palydovų orbitose.

3.2.4. Aberacijos ir teleskopų objektyvai

Vienas lęšis ar įgaubtasis sferinis veidrodis, nors ir idealiai pagaminti, duoda itin netobulus atvaizdus (nepaisant difrakcijos reiškinio). Optinių prietaisų kuriamų atvaizdų iškraipymai vadinami ***aberacijomis***. Aberacijų priežastys yra įvairios. ***Chromatinė aberacija*** (atvaizdai neryškūs, spalvotais pakraščiais) atsiranda dėl nevienodo įvairių spalvų šviesos lūžimo lęšiuose. ***Sferinė aberacija*** (net pagrindinėje optinėje ašyje taško atvaizdas virsta skrituléliu) atsiranda dėl to, kad lęšis ar sferinis veidrodis nesurenka į vieną židinį plataus ir lygiagretaus pagrindinei optinei ašiai spindulių pluošto. Nesueina į vieną tašką ir spindulių pluoštas, krintantis kampu į pagrindinę optinę ašį. Taip susidaro ***neašinės aberacijos – koma***, ***astigmatizmas*** ir kt. (toliau nuo optinės ašies atvaizdai pailgi ar nevienodai apšviestos dėmelės pavidalo).

Visiškai pašalinti visas aberacijas labai sunku. Praktiškai pakanka jas sumažinti iki difrakcinio atvaizdo matmenų, kadangi difrakcija neišvengiama. Todėl refraktorių objektyvai daromi iš dviejų ar daugiau skirtingos formos ir skirtingos stiklo rūšies (skirtingo lūžio rodiklio) lęšių. Dviejų gerai pasirinktų lęšių objektyvas (achromatas) smarkiai sumažina tam tikrame spektro ruože chromatinę aberaciją ir panaikina sferinę aberaciją, tačiau neašinėms aberacijoms apriboti paprastai reikia jau daugiau lęšių. Tokius objektyvus sunku pagaminti ir, be to, juose šviesa gerokai susilpnėja, nors lęšiai būtinai skaidrinami (padengiami specialia plėvele, mažinančia atspindžius). Esamų sudėtingų objektyvų skersmenys nebūna didesni kaip 0,5 m, o didesni refraktoriai turi tiktai dvilęšius objektyvus. Toks yra ir didžiausio pasaulyje refraktoriaus 1,02 m skersmens objektyvas. Šis teleskopas veikia Jerkyzo (Yerkes) observatorijoje (JAV).

Lengviausia pagaminti sferinius veidrodžius, tačiau jiems būdinga sferinė aberacija. Ji dingsta, jei veidrodis yra paraboloido formos. Tokio tipo veidrodžius turi daugelis pasaulio teleskopų. Deja, paraboliniai veidrodžiai turi didelį trūkumą – nepanaikintas



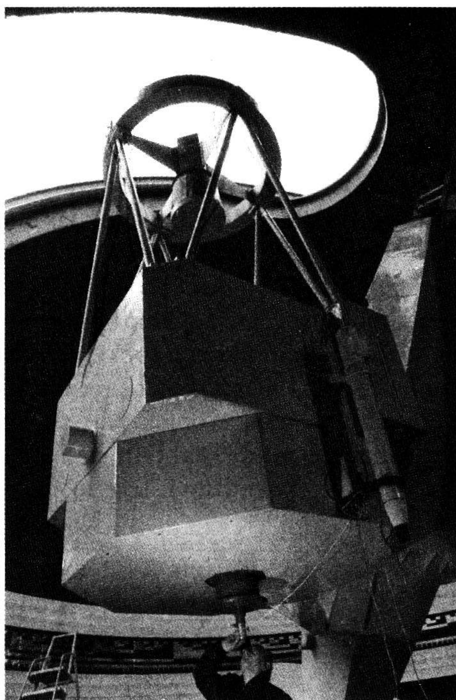
3.2 pav. *Šmito (a) ir Maksutovo (b) teleskopų optinės schemos*

neašines aberacijas, ypač komą. Kokybiškus atvaizdus jie kuria tiktai arti pagrindinės optinės ašies, todėl tokiais teleskopais vienu metu galima stebėti labai mažą, keleto lanko minučių, dangaus plotelį. Keleto laipsnių skersmens dangaus sklypui fotografuoti buvo sugalvotos optinės sistemos, kuriose sferinės aberacijos išvengiama derinant sferinį veidrodį su tam tikros formos lęšiu, atitinkamai koreguojančiu krintančios šviesos bangos frontą. **Šmito* teleskopuose** (**3.2** pav., *a*) veidrodžio kreivumo centre statoma plokštelė, kurios vienas šonas yra sudėtingo profilio, o kitas – plokščias. **Maksutovo teleskopuose** (**3.2** pav., *b*) prieš sferinį veidrodį, tiksliai apskaičiuotoje vietoje, dedamas plonas iškilai įgaubtas lęšis (**meniskas**) su beveik vienodais paviršių kreivumo spinduliais.

3.2.5. Refraktorių ir reflektorių palyginimas

Šviesulių atvaizdus gali darkyti objektyvo gamybos trūkumai, vėlesnės deformacijos. O tikslumas optikoje turi būti labai didelis: realusis lęšio ar veidrodžio paviršius neturi nukrypti nuo numatytojo daugiau kaip 1/8 šviesos bangos ilgio.

Teleskopų veidrodžiai gaminami iš specialaus stiklo, o nušlifuotasis paviršius padengiamas plonu aliuminio sluoksniu, atspindinčiu apie 90% šviesos. Objektyvą didesniam refraktoriui kur kas sunkiau pagaminti, negu veidrodį reflektoriui, nes juvelyriškai apdoroti reikia mažų mažiausiai keturis paviršius (du lęšiai), o ne vieną. Be to, labai sunku išlydyti didelius vienodo skaidrio stiklo gabalus. Minėti sunkumai ir kitos priežastys (pavyzdžiui, didelių lęšių deformacijos dėl jų svorio) lėmė, kad refraktoriai savo matmenimis smarkiai atsiliko nuo reflektorių. Reflektoriai



3.3 pav. *Molėtų observatorijos 1,65 m skersmens teleskopas*

* Teleskopų sistemos paprastai vadinamos jas pasiūliusių ar įgyvendinusių mokslininkų ar optikų pavardėmis. Dažniausiai minimi anglas I. Niutonas, prancūzai N. Kasegrenas (*N. Cassegrain*) ir H. Kretjenas (*H. Chretien*), estas B. Šmitas (*B. W. Schmidt*), amerikietis Dž. Ričis (*G. W. Ritchey*), rusas D. Maksutovas (*D. D. Maksutov*).

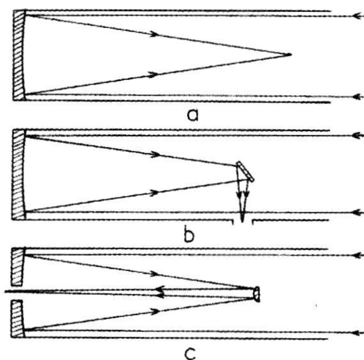
pranoksta refraktorius ir kitomis savybėmis. Jie neturi chromatinės aberacijos, jais galima tirti dangaus šviesulius ultravioletiniuose ir infraraudonuosiuose spinduliuose (refraktorių objektyvai, pagaminti iš dažniausiai naudojamų stiklo rūšių, didelę dalį šių spindulių sugeria). Reflektoriai tapo pagrindiniu astrofizikų instrumentu. Refraktoriai dar panaudojami tada, kai norima tiksliai išmatuoti šviesulių padėtis dangaus sferoje, t. y. astrometrijoje, nors tam galima pritaikyti ir reflektorių. Didžiausi pasaulio reflektoriai surašyti knygos priedo 5-oje lentelėje. Didžiausias Lietuvoje yra Molėtų observatorijos 1,65 m skersmens reflektorius (**3.3** pav.).

3.2.6. Teleskopo vamzdis

Teleskopo objektyvą, šviesos imtuvus ir kitą pagalbinę įrangą sujungia vamzdis. Teleskopo vamzdis turi būti labai tvirtas, kad, kintant jo padėčiai horizonto atžvilgiu, išliktų nepakitusi prietaiso optinė sistema. Vamzdžiai būna ištisiniai, karkasiniai ar tiesiog strypinės sistemos.

3.2.7. Reflektorių sistemos

Refraktoriuje objektyvas įtaisytas vamzdžio priekyje (į dangų pasuktoje pusėje), o kita aparatūra – apatinėje dalyje, ten kur yra objektyvo židinys. Reflektoriaus konstrukcija visai kitokia: veidrodis čia įtvirtinamas vamzdžio apačioje, o jo židinys yra ateinančių iš šviesulio spindulių pluošte (**3.4** pav., *a*). Aišku, tiesiog židinyje esantis šviesos imtuvas užstoja dalį spindulių, ir į tai galima nekreipti dėmesio tiktai dideliuose teleskopuose. Didžiausių (daugiau kaip trijų metrų skersmens) reflektorių vamzdžio viduje, aukštai viršuje, įrengiama netgi kabina stebėtojui (netenkama maždaug 10% šviesos). Mokslininkai bei optikai yra pasiūlę keletą reflektorių sistemų, kuriose palyginti mažas pagalbinis veidrodis (ar veidrodžiai) atsispindėjusius nuo objektyvo spindulius nukreipia į vamzdžio išorę. Pavyzdžiui, **Niutono sistemos** reflektoriuje (**3.4** pav., *b*) židinį už vamzdžio šono perkelia plokščiasis veidrodis, pastatytas 45° kampu į pagrindinio parabolinio veidrodžio simetrijos ašį. Labai paplitusiuose **Kasegreno sistemos** teleskopuose (**3.4** pav., *c*) papildomai statomas iškilusis hiperbolinis veidrodis, kuris padidina reflektoriaus židinio nuotolį ir pagrindinio parabolinio veidrodžio sutelktą šviesą pro jo

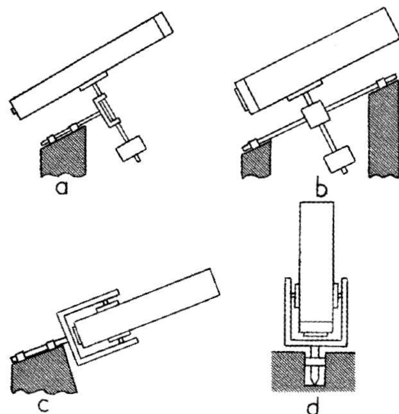


3.4 pav. *Kai kurios reflektorių sistemos: a) tiesioginio židinio sistema, b) Niutono sistema, c) Kasegreno sistema*

centre išgręžtą skylę nukreipia į vamzdžio galą. Tokia sistema labai patogi, nes, kaip ir refraktoriuose, šviesos imtuvai tvirtinami vamzdžio gale. Iš išorės į Kasegreno sistemos reflektorius yra labai panašūs **Ričio ir Kretjeno** sistemos teleskopai, tiktai juose ir pagrindinis veidrodis yra hiperboloido formos. Pagrindinė šių reflektorių ypatybė – didelis aberacijų nesugadintas regėjimo laukas (1–2°). Tai pasiekiama labai kruopščiai parinkus abiejų veidrodžių formą ir atstumą tarp jų.

3.2.8. Teleskopo montuotė

Antžeminio teleskopo vamzdį laiko ir judėjimo laisvę jam suteikia speciali mechaninė konstrukcija, vadinama ***teleskopo montuote***. Ji turi dvi viena kitai statmenas ašis. Prie vienos ašies statmenai tvirtinamas teleskopo vamzdis, o kita ašis dedama ant atramos. Šią ašį, turint omenyje, kad reikia stebėti lygiagrečiai dangaus pusiaujui judančius šviesulius, patogu nukreipti į dangaus polių (**polinė ašis**). Tada antroji (**deklinacijų**) **ašis** yra dangaus pusiaujo plokštumoje, ir, kartą nutaikius vamzdį į tiriamąjį objektą, toliau jį tereikia sukti tik apie vieną – polinę – ašį (kinta tik šviesulio valandinis kampas, o deklinacija nekinta). Teleskopą tolygiai suka specialus laikrodinis mechanizmas. Tokio tipo montuotės vadinamos **pusiaujinėmis montuotėmis**. Jos būna kelių variantų. Mažų teleskopų polinė ašis dedama ant vieno stovo (**3.5** pav., *a*), didelių – ant dviejų (**3.5** pav., *b*), o kai kurių sistemų teleskopams ypač tinka **šakutės tipo montuotė** (**3.5** pav., *c*). Dideli ir sunkūs teleskopai turi **azimutinę montuotę** (**3.5** pav., *d*), kurioje viena ašis pasukta į zenitą, o toji, prie kurios tvirtinamas vamzdis, yra horizonto plokštumoje. Tai kompaktiška ir labai tvirta montuotė, bet čia vamzdį, kad jis sektų paskui šviesulį, reikia sukti apie abi ašis ir dar netolygiai (taip kinta šviesulio azimutas ir aukštis). Šis azimutinės montuotės trūkumas pasidaro nereikšmingas, kai teleskopą valdo kompiuteris.



3.5 pav. *Teleskopų pusiaujinės montuotės tipai (a,b,c) ir azimutinė montuotė (d)*

Dažnai šalia teleskopo vamzdžio matyti kitas mažesnio skersmens vamzdis. Tai – **gidas**. Juo žiūrima, ar teleskopas gerai seka šviesulio parinį judėjimą. Didelio židinio nuotolio teleskopui valdyti panaudojama jo paties optinė sistema.

Teleskopai statomi ant tvirtų pamatų po sukamu kupolu, kuriame įrengtas atsidarinėjantis plyšys stebėjimams, arba po nustumiamu ar kitaip atsiveriančiu stogu.

3.2.9. Naujos kartos optiniai teleskopai

XX a. pabaigoje bendras pasaulio observatorijų teleskopų veidrodžių plotas buvo didesnis nei 1000 m^2. Sparčiausiai (eksponentiškai) šis plotas didėjo per paskutinįjį amžiaus dešimtmetį, kuomet pasirodė naujos kartos labai dideli, 8–10 m skersmens, teleskopai (žr. 5 lentelę). Kiekybinį ir kokybinį šuolį teleskopų gamyboje lėmė technikos laimėjimai bei valstybių ir tarpvalstybinių organizacijų, sužavėtų astronomijos atradimais, parama.

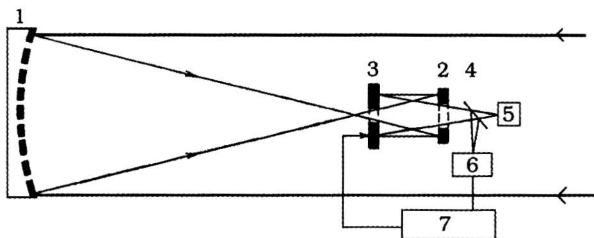
Naujos technologijos labiausiai paveikė teleskopų veidrodžius. Tobulai nušlifuoti didelio teleskopo veidrodžio paviršių yra labai sunku. Jeigu tai ir pavyksta, vėliau, pritvirtinus veidrodį prie teleskopo vamzdžio, atsiranda deformuojantys veiksniai. Veidrodžio paviršių iškreipia sunkio jėga (kai kinta veidrodžio padėtis horizonto atžvilgiu), šiluminis plėtimasis (kai kinta temperatūra po kupolu), vėjas. Norint šiuos efektus sumažinti, dideli veidrodžiai anksčiau buvo daromi labai stori ir masyvūs. Dabar tokių veidrodžių, padarytų „visiems laikams“, epocha baigėsi. Kompiuterių amžiuje tokius objektyvus keičia plonesni veidrodžiai, o jų neišvengiamos deformacijos nuolat (stebėjimų metu) sekamos ir tuoj pat aktyviai šalinamos. Tai galima daryti šitaip. Teleskopo veidrodžio paviršiaus būklę rodo šviesulių atvaizdų kokybė. Specialus atvaizdų analizatorius sujungiamas su kompiuteriu, o pastarasis, apdorojęs informaciją, siunčia signalus atitinkamoms veidrodžio atramoms, kurios, paspausdamos reikiamas veidrodžio vietas, pataiso jo formą. Galima dar įvairiai orientuoto veidrodžio formą modeliuoti ir pagal tai keisti tam tikrų atramų slėgį. Taip patobulinti teleskopai vadinami **aktyvios optikos** teleskopais.

Naujų 8 m skersmens veidrodžių masė yra apie 20 tonų, t. y. maždaug lygi ankstesnių 4–6 m veidrodžių masei. Aišku, kuo mažesnė veidrodžio masė, tuo paprastesnė ir pigesnė visa teleskopo konstrukcija (8 m teleskopų judamosios dalies masė būna 300–500 tonų).

Šiuolaikiniai veidrodžių šlifavimo bei paviršiaus kontrolės metodai leidžia gaminti ne tik didelius, bet ir mažo židinio nuotolio (palyginti didelės nuokrypos nuo sferinio paviršiaus) veidrodžius. Tai sutrumpina teleskopą ir sumažina jam skirtos patalpos matmenis, tuo pačiu ir kainą.

Kaip minėta, teleskopo veidrodžio paviršiaus formą gali deformuoti temperatūros kitimas. Dabar veidrodžiams lieti sukurtos medžiagos (specialus stiklas, stiklo keramika ir kt.), kurių šiluminės plėtros koeficientas kambario temperatūroje yra artimas nuliui. Be to, teleskopo patalpoje įrengiamos ventiliacijos ir oro kondicionavimo sistemos, kurios dieną palaiko tokią temperatūrą, kokia numatoma būsimą stebėjimų naktį. Kita vertus, tokios priemonės sumažina teleskopo aplinkoje lokalines šilumines oro sroves, kurios darko šviesulio atvaizdą.

Teleskopo veidrodžio paviršiaus forma dėl minėtų priežasčių kinta palyginti



3.6 pav. *Adaptyviosios optikos teleskopo schema: 1 – pagrindinis veidrodis, 2 – antrinis veidrodis, 3 – deformuojamasis veidrodis korektorius, 4 – pusiau skaidrus veidrodis, 5 – imtuvas, 6 – bangos fronto jutiklis, 7 – kompiuteris*

lėtai, todėl jo korekciją galima planuoti kas sekundę ar dar rečiau. Daug operatyvesnių kompiuterio veiksmų reikia norint atsikratyti oro turbulencijos sukeltų ir labai greitai kintančių (per šimtąsias ar tūkstantąsias sekundės dalis) atvaizdų iškraipymų. Labai greitai korekcijai į teleskopo optinę sistemą įterpiamas papildomas lankstus veidrodis, kuris akimirksniu reaguoja į kompiuterio, sujungto su bangos fronto jutikliu, signalus ir iškreipia krintančios šviesos bangos frontą priešinga kryptimi, negu tai daro oro srovės, t. y. kompensuoja pastarųjų įtaką (**3.6** pav.). Tiktai atvaizdui tirti reikia, kad teleskopo regėjimo lauke būtų gana didelio spindesio tikra ar dirbtinė (galingo lazerio spindulio sužadintas atmosferos švytėjimas maždaug 100 km aukštyje) žvaigždė. Tokios optinės sistemos (vadinamos **adaptyviomis**), priartindamos prietaiso skiriamąją gebą prie teorinės, atveria puikias antžeminių teleskopų perspektyvas. Šiek tiek sumažėja labai brangių kosminių optinių teleskopų poreikis.

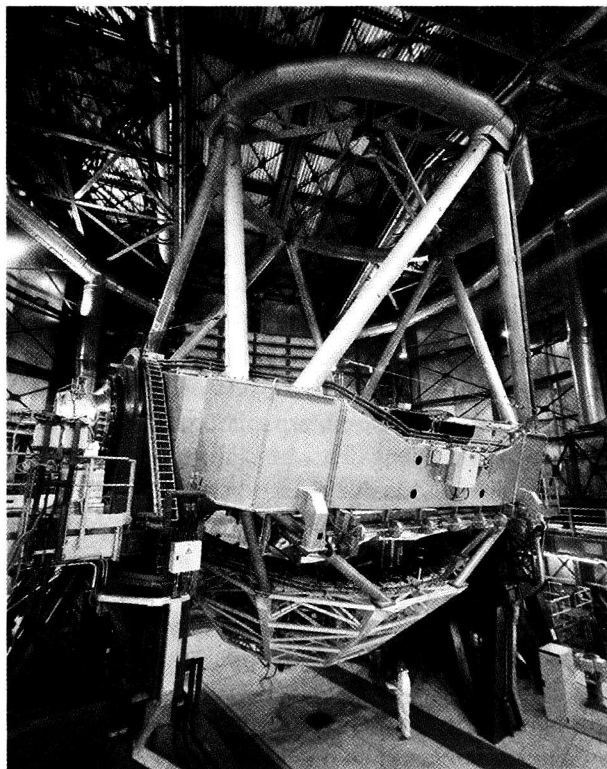


3.7 pav. *Mauna Kea observatorija*

Astronomijai reikia vis didesnio skersmens teleskopų. Monolitinių didelių veidrodžių gamyba yra labai sunki ir brangi. Vargu ar taip galima peržengti 10 metrų ribą. Geresnes perspektyvas turi veidrodžiai, sudėlioti iš daugelio palyginti nedidelių, pavyzdžiui, šešiabriaunių, veidrodinių segmentų, kurių padėtį kontroliuoja kompiuteris. Štai 1992 m. didžiausiu pasaulio optiniu teleskopu tapo Keko (*Keck* – fundatoriaus pavardė) teleskopas, įrengtas Mauna Kea observatorijoje (Havajai, JAV; **3.7** pav). Jo veidrodį sudaro 36 šešiakampiai 1,8 m skersmens ir 7,5 cm storio segmentai, kurių formuojamą paviršių (hiperboloidą) du kartus per sekundę tikrina kompiuteris. Pagal visų segmentų bendrą plotą šį teleskopą galima sulyginti su vieno veidrodžio, kurio skersmuo 10 metrų, instrumentu. Keko teleskopo veidrodžio masė tėra tik 14 tonų. Po kurio laiko ten pat buvo pastatytas antras lygiai toks pat teleskopas. Atstumas tarp šių dviejų teleskopų – 85 m. Veikdami kartu (tam reikia papildomos optikos), jie tampa žvaigždžių interferometru, kuriam pagal skiriamąją gebą prilygtų tik 85 m skersmens teleskopas (apie šio metodo idėją žr. **1.20.5**). Kanarų salose (Ispanija) stovi teleskopas, analogiškas Keko teleskopams, tiktai jo veidrodžio segmentai šiek tiek didesni. Todėl jo visas veidrodis yra 10,4 m skersmens, ir kurį laiką šiam įrenginiui teks didžiausio atskiro teleskopo šlovė. Tiesa, JAV ir Pietų Afrikoje įrengti 11 m skersmens sferiniai veidrodžiai sudėlioti iš 91 mažesnio šešiabriauno veidrodžio. Tačiau šie teleskopai neturi įprastos teleskopams montuotės, gali sukiotis tik apie vertikalią ašį, yra nepaslankūs, ir tik panaudojus papildomą judančią optiką, įmanoma atlikti stebėjimus 70% dangaus plote. Dėl šių instrumentų ypatingos (pigesnės) konstrukcijos efektyviai išnaudojamas ne visas veidrodžio plotas, o tik jo dalis atitinkanti 9,2 m teleskopą.

Vakarų Europos astronomai Čilės kalnuose įrengė netoli vienas kito keturis 8,2 metro reflektorius. Juos galima naudoti individualiai, o prireikus nukreipti į vieną šviesulį ir sudėti visų veidrodžių sukauptą šviesos energiją. Pastaruoju atveju sistema atstoja 16,4 m skersmens veidrodį, t. y. tampa didžiausiu pasaulio teleskopu! Be to, tokia sistema naudojama kaip optinis interferometras: sistemos skiriamoji geba siekia 0″,001 (bazė – 130 m)! Pirmasis šios sistemos teleskopas pradėjo veikti 1998 m. (**3.8** pav.)

1990 m. į 600 km aukščio orbitą JAV buvo iškeltas Ričio ir Kretjeno sistemos optinis teleskopas su 2,4 m skersmens veidrodžiu. Veidrodis tinka ir ultravioletiniams bei infraraudoniesiems spinduliams fokusuoti. Nors tai nėra didelis palyginti su antžeminiais milžinais teleskopas, tačiau jis atvėrė naują puslapį astronomijoje. Akivaizdžiai buvo parodyta, kokią žalą antžeminiams stebėjimams daro nerami ir švytinti (ypač infraraudonoje srityje) atmosfera. Pasiekta teorinė prietaiso skiriamoji geba (0,″05, kai $\lambda = 500$ nm) leidžia įžvelgti dangaus objektuose niekada neregėtų detalių. Kosminis teleskopas pavadintas Hablo (*E. P. Hubble*) – žymaus XX a. pirmosios pusės JAV astronomo – vardu. XXI a. pirmajame dešimtmetyje numatoma sukurti antros kartos kosminį



3.8 pav. *Vienas iš keturių 8,2 m skersmens reflektorių, pastatytų Čilės kalnuose*

teleskopą: greičiausiai jo veidrodis bus 6 m skersmens! Kosminiai teleskopai yra labai brangūs, ir dar ilgai didžioji darbų dalis bus atliekama antžeminių observatorijų prietaisais. Juo labiau, kad kuriami projektai teleskopų, kurių veidrodžių skersmenys sieks 30–50 ar net 100 metrų!

3.2.10. Saulės teleskopai

Teleskopai Saulei stebėti skiriasi nuo įprastinių teleskopų. Saulė pažeria labai daug šviesos, ir ją tirti galima labai didelio židinio nuotolio teleskopu, duodančiu didelio mastelio atvaizdus. Tokį prietaisą daug paprasčiau įrengti nejudamai, bet tada reikia sustabdyti slenkančios dangumi Saulės spindulį. Tam yra ***celostatas*** (lot. *caelum* – dangus + gr. *statos* – stovintis) t. y. plokščiasis veidrodis, kuris gali suktis apie nukreiptą į dangaus polių ašį (veidrodžio plokštuma sutampa su šia ašimi). Gerai žinoma, kad veidrodžiui pasisukus kampu α, atsispindėjusio spindulio kryptis pakinta kampu 2α. Jeigu Saulės regimojo parinio judėjimo kampinis greitis yra du kartus didesnis negu celostato kampinis greitis (vienas apsisukimas per dvi paras), tai Saulės šviesa bus atspindi-

ma nuo celostato visą laiką viena kryptimi. Pagalbinis veidrodis stabilizuotą erdvėje spindulį nukreipia į nejudamo teleskopo objektyvą. Saulės teleskopai būna **horizontalieji** ir **vertikalieji** (**bokštiniai**).

3.3. RADIOTELESKOPAI

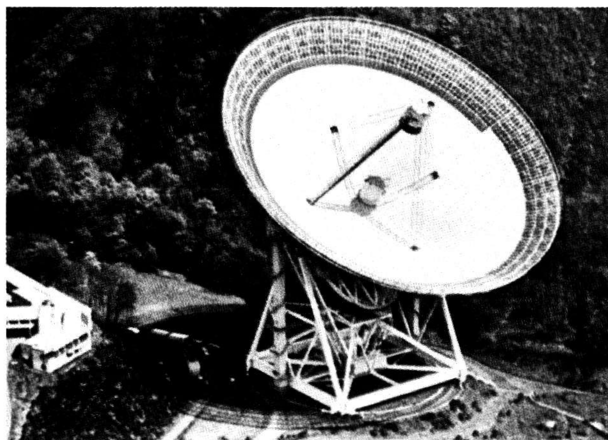
Įrenginys kosminiams radijo bangų šaltiniams tirti vadinamas ***radioteleskopu***. Jį sudaro **antena** ir labai jautrus radijo imtuvas (**radiometras**). Antenoje radijo bangos sukelia elektrinius virpesius, o imtuvas, kabeliu ar bangolaidžiu sujungtas su antena, juos sustiprina ir užregistruoja. Kosminis radijo signalas registruojamas triukšmų pavidalu. Norint kiekybiškai įvertinti šiuos triukšmus, reikia juos lyginti su kalibruoto laboratorinio šaltinio triukšmais. Toks šaltinis gali būti rezistorius, kurio galuose dėl šiluminio elektronų judėjimo visada vyksta netaisyklingi įtampos svyravimai. Šio šaltinio triukšmų galia W_R priklauso nuo temperatūros T. Būtent įrodoma, jog $W_R = \Delta\nu \cdot kT$; čia $\Delta\nu$ – dažnių intervalas, k – Bolcmano konstanta. Vadinasi, galima kalbėti ir apie antenos temperatūrą, suprantant ją kaip temperatūrą triukšmų generatoriaus, kurio galia yra lygi priimamų radijo bangų triukšmų galiai. Vadinamoji ***antenos temperatūra*** T_A, aišku, neturi nieko bendra su tikruoju antenos įšilimu, o tėra parametras, aprašantis priimtos spinduliuotės galią W_A, t. y. $W_A = \Delta\nu \cdot kT_A$.

Pirmą kartą kosminės kilmės radijo bangas priėmė ir atpažino JAV radijo inžinierius Karlas Janskis (*K. H. Jansky*) 1931 m. Astronominių šaltinių radijo bangų srauto tankis prie Žemės yra labai mažas, todėl radioteleskopų antenos turi būti didelių matmenų, kad surinktų bangų energiją iš kuo didesnio ploto.

3.3.1. Parabolinės antenos

Radioteleskopų yra įvairių konstrukcijų. Daugelis jų primena smarkiai padidintus optinius teleskopus – reflektorius. Tokio tipo prietaisuose radijo bangas surenka ir fokusuoja paraboloido formos metalinis veidrodis, vadinamas tiesiog ***paraboline antena*** (**3.9** pav.). Energija į imtuvą perduodama iš mažos priimamosios antenos (dipolio), įrengtos veidrodžio židinyje. Kaip ir optiniuose teleskopuose, realus radioteleskopo veidrodžio atspindintis paviršius nuo numatyto paraboloidinio neturi skirtis daugiau kaip 1/8 λ (čia λ – radijo bangų ilgis). Radijo bangų diapazone tai jau ne toks mažas dydis, ir todėl galima konstruoti ilgo skersmens parabolines antenas. Sunkiau padaryti didelę anteną submilimetrinėms ir milimetrinėms bangoms, tačiau ilgesnėms bangoms primti yra antenų, kurių skersmenys – dešimtys ar net šimtai metrų. Decimetrinėms ir metrinėms bangoms fokusuoti tinka metalinis tinklelis (vietoj ištisinio paviršiaus), ištemptas ant paraboloido formos karkaso.

Labai sunkūs radioteleskopų veidrodžiai statomi ant azimutinės montuotės. Didžiausias pasaulyje judamasis radioteleskopas pastatytas JAV: jo para-



3.9 pav. *Šimtametris radioteleskopas, esantis netoli Bonos (Vokietija)*

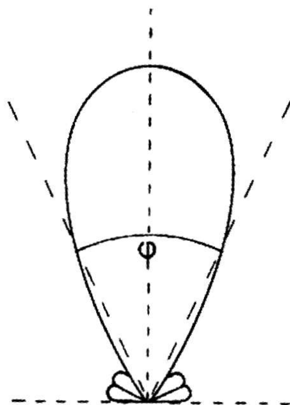
bolinė antena yra 100 × 110 metrų dydžio. Atspindintis paviršius sudėliotas iš 2004 reikiamos formos aliumininių segmentų. Specialūs šių segmentų laikikliai, valdomi lazerinės kontrolės sistemos, palaiko viso milžiniško veidrodžio formą 0,25 mm tikslumu, tai leidžia šiuo naujos kartos įrenginiu stebėti dangų ir milimetriniame diapazone. Veidrodžio formą gali deformuoti vėjas, oro temperatūros kitimas, sunkio jėga, kai kinta antenos padėtis horizonto atžvilgiu. Aišku, labai didelės antenos formą lengviau išlaikyti, jeigu ji nejuda. Didžiausia pasaulyje 305 metrų skersmens nejudama antena stovi Puerto Riko saloje (JAV). Šiai didžiulei (sferinei) antenai įrengti buvo panaudota gamtinė įduba – užgesusio vulkano krateris. Nejudamame radioteleskope judamai įtaisoma antena, sugerianti teleskopo veidrodžio sufokusuotas radijo bangas. Ši priemonė, taip pat dangaus sferos parinis sukimasis leidžia ir nejudamu radioteleskopu stebėti radijo šaltinius gana dideliame dangaus plote.

Nuo radioteleskopo antenos dydžio priklauso jo ***jautris*** ir ***skiriamoji geba***. Pastarąją radioteleskopo savybę sąlygoja **antenos kryptingumas**, apibūdinamas antenos **kryptingumo diagrama**. Ji parodo, kaip kinta antenos jautris kintant radijo šaltinio padėčiai jos atžvilgiu. Parabolinė antena efektyviausiai priima radijo bangas, kai šaltinis yra jos geometrinėje ašyje, tolstant nuo šios ašies antenos jautris mažėja, ir tik tam tikromis kryptimis vėl pasirodo maži jautrio padidėjimai. Simetriškos parabolinės antenos kryptingumo diagramos pjūvis plokštuma, einančia per antenos ašį, parodytas **3.10** pav. Diagramoje matyti pagrindinis lapelis ir maži šoniniai („parazitiniai“) lapeliai. Antenos kryptingumo diagramą įprasta apibūdinti kampu tarp krypčių į tuos jos pagrindinio lapelio taškus, kurie vaizduoja perpus sumažėjusį antenos jautrį (**3.10** pav. kampas φ). Parabolinei antenai šis kampas

$$\varphi = \frac{\lambda}{D}\,\text{rad} = 57°,3\frac{\lambda}{D}, \qquad (3.6)$$

čia λ – radijo bangų, kurias išskiria teleskopo radijo imtuvas, ilgis, D – antenos skersmuo.

Antenos kryptingumo diagramos pagrindinio lapelio kampinis plotis (kampas φ) apibūdina radioteleskopo ***skiriamąją gebą***. Radioteleskopas atskiria du taškinius radijo šaltinius tik tada, kai kampinis atstumas tarp jų ne mažesnis kaip kampas φ. Veidrodinių radioteleskopų, kaip ir optinių, skiriamąją gebą sąlygoja bangų difrakcijos reiškinys (palyginkite (**3.4**) ir (**3.6**) formules). Radioteleskopų veidrodžiai labai dideli, tačiau radijo bangų difrakcija nuo veidrodžio kraštų reiškiasi itin smarkiai – lemia bangos ilgis. Radioteleskopų skiriamoji geba daug mažesnė už įprastų optinių teleskopų skiriamąją gebą (maždaug 1″). Pavyzdžiui, 305 m skersmens radioteleskopo skiriamoji geba 70 cm bangoje tėra 8′ (φ = 0,7:305 × 57 × 60).



3.10 pav. *Antenos kryptingumo diagrama*

Radioteleskopo veidrodžiu gali būti ne visas paraboloidinis paviršius, o tik tam tikra jo dalis. Kartais paraboloidinio paviršiaus segmentas sudėliojamas iš palyginti mažų plokščių metalinių veidrodžių. Toks, pavyzdžiui, yra labai didelis radioteleskopas, įrengtas Šiaurės Kaukaze. Jo veidrodis sudarytas iš 895 atskirų 2 m pločio ir 7,4 m aukščio elementų, išdėliotų maždaug 600 m skersmens žiedu.

3.3.2. Sinfazinės antenos

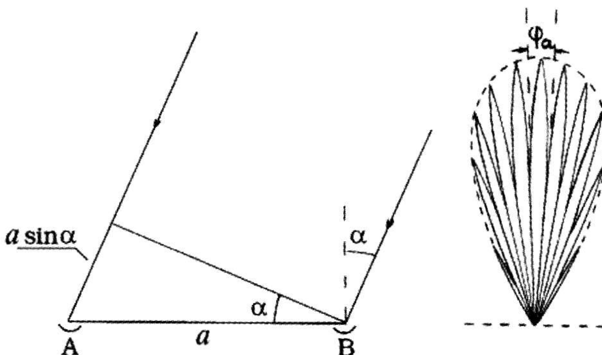
Kelių metrų ir ilgesnėms radijo bangoms priimti statomi teleskopai, kuriuose bangos krinta tiesiai į anteną (nėra bangas fokusuojančio veidrodžio). Šio tipo radioteleskopuose naudojamos vadinamosios ***sinfazinės antenos***. Tai sudėtinės antenos, sudarytos iš daugelio plokščiame paviršiuje atitinkamai išdėstytų elementų – elementarių antenų (pusbangių dipolių, spiralinių antenų, mažų veidrodinių antenų ir pan.). Čia atskiri elementai sujungiami su imtuvu tokio ilgio kabeliais (bangolaidžiais), kad visuose elementuose atsiradusios aukštojo dažnio srovės pasiektų imtuvą būdamos vienodos fazės. Sinfazinės antenos yra kryptingos. Jos jautriausios bangoms, kurios sklinda palei antenos ašį, t. y. statmenai elementų išrikiavimo plokštumai (tada visuose elementuose sužadintų srovių fazės yra vienodos). Jeigu sinfazinės antenos ilgis a, o plotis b, tai jos kryptingumo diagramos pagrindinio lapelio plotis briaunos a kryptimi lygus λ/a, o briaunos b kryptimi – λ/b, t. y. jos skiriamoji geba priklauso nuo krypties. Sinfazines antenas lengviau padaryti negu veidrodžius, tačiau jos turi didelį trūkumą – tinka tik labai siauram bangų ilgių ruožui.

3.3.3. Radiointerferometrai

Maža skiriamoji geba – bendra visų, kad ir pačių didžiausių, radioteleskopų yda. Tačiau, kai jie tampa ***radiointerferometro*** elementais, skiriamosios gebos problema išnyksta. Paprasčiausią radiointerferometrą sudaro du toli vienas nuo kito esantys radioteleskopai, kabeliu, bangolaidžiu ar retransliacine ryšio linija sujungti su bendru imtuvu. Linija, jungianti abu teleskopus, vadinama radiointerferometro ***baze***.

Tarkime, atstumu a nuo antenos A stovi kita tokia pat antena B, ir jų ašys statmenos linijai (bazei) AB (**3.11** pav.). Radijo banga, krintanti statmenai bazei, abi antenas pasiekia kartu, signalai iš jų į imtuvą ateina vienodos fazės ir susideda – sistema priima radijo spinduliuotę. Radijo banga, kurios frontas palinkęs į bazę kampu α, antenas pasiekia ne tuo pat metu, susidaro bangos eigos skirtumas $a\sin\alpha$. Kai $a\sin\alpha = \lambda/2$, signalai iš antenų į imtuvą ateina priešingų fazių ir naikinasi – sistema netenka jautrio. Tai atitinka kampą $\alpha = \lambda/(2a)$ (kai a didelis, $\sin\alpha \approx \alpha$). Imtuvas neregistruoja radijo bangų ir kryptimis, kurios atitinka kampus $\alpha = \frac{3\lambda}{2a}, \frac{5\lambda}{2a}$ ir t. t. Taigi kai viena antena sudaro sistemą su kita antena, jos kryptingumo diagrama bazės kryptimi suskyla į daugelį siaurų lapelių, kurių kampinis plotis $\varphi_a = \lambda/a$. Dviejų antenų radiointerferometro kryptingumo diagramos pjūvis plokštuma, einančia per antenų ašis, parodytas **3.11** pav. Gaubiamoji (brūkšninė linija) vaizduoja vienos antenos kryptingumo diagramą. Statmena bazei kryptimi radiointerferometro skiriamoji geba tokia pat kaip vieno radioteleskopo.

Kai dėl parinio dangaus sferos sukimosi radijo šaltinis pereina nejudamos antenos kryptingumo diagramą, imtuvas brėžia kreivę – registrogramą, rodančią priimamojo signalo intensyvumo kitimą. Kaip registrogramos pavidalas priklauso nuo prietaiso rūšies ir radijo šaltinio savybių, iliustruojama **3.12** pav. Matyti, jog registrogramose, užrašytose interferometru, radijo šaltinio kampi-

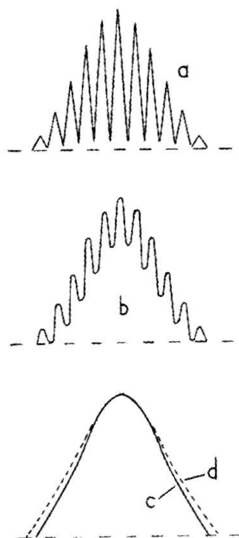


3.11 pav. *Radiointerferometro schema (kairėje) ir jo kryptingumo diagrama*

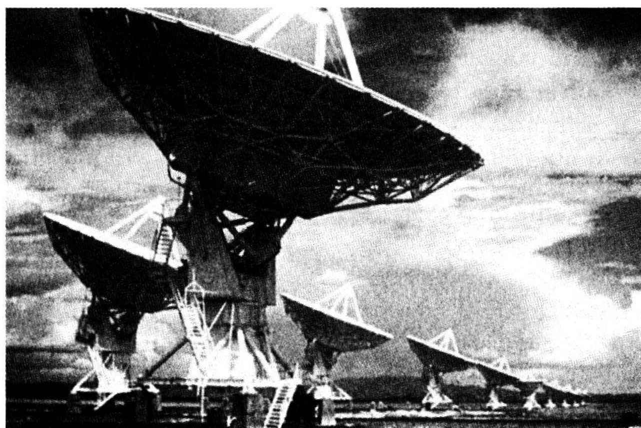
niai matmenys atsiskleidžia geriau negu registrogramose, gautose paprastu radioteleskopu.

Radiointerferometrų su vienu imtuvu bazės būna iki 100 km. Bazės ilgio niekas neriboja, kai sistemos antenos dirba nepriklausomai, o lyginami tik stebėjimų rezultatai, užrašyti kartu su sinchroniškai einančių atominių laikrodžių parodymais į magnetines juostas ar kompiuterių diskus. Tarpžemyninių radiointerferometrų bazės – tūkstančiai kilometrų, o jų skiriamoji geba centimetrinių bangų diapazone apie 0″,001. Dar didesnę skiriamąją gebą galima pasiekti išvedus bent vieną anteną į tarpplanetinę erdvę. Štai 1997 m. į ištęstą DŽP orbitą buvo iškeltas japonų 8 m skersmens radioteleskopas. Kai jis yra apogėjuje, didžiausias atstumas tarp jo ir kurio nors antžeminio radioteleskopo siekia 33 000 km. Tokio ilgio bazė leidžia pasiekti 0″,0003 skiriamąją gebą! Ateityje, aišku, radijo antenos bus skraidinamos dar toliau nuo Žemės, kosminių radiointerferometrų skiriamoji geba išaugs iki tokio dydžio, apie kurį dar neseniai buvo tik svajojama.

Detaliam pratisų šaltinių radijo vaizdui gauti naudojami interferometrai su kintamo ilgio ir kintamos orientacijos baze. Tam galima, pavyzdžiui, panaudoti du judamus, ant bėgių įrengtus teleskopus. Dar reikia nepamiršti, kad bazės erdvinė orientacija radijo šaltinio atžvilgiu kinta dėl Žemės sukimosi apie ašį. Daug privalumų turi interferometrai iš daugelio elementų,



3.12 pav. *Radiointerferometru (a, b) ir vienišu radioteleskopu (c, d) gautos taškinio (a, c) ir pratiso (b, d) radijo bangų šaltinių registrogramos (pratiso šaltinio kampiniai matmenys mažesni už vienos antenos kryptingumo diagramos pagrindinio lapelio plotį)*



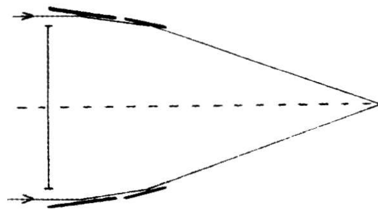
3.13 pav. *VLA fragmentas*

kuriuose bent dalis antenų gali judėti. Vienuose jų elementai išdėstyti viena linija, dažniausiai vakarų–rytų kryptimi, o kituose – pagal T arba Y raidžių konfigūracijas. Pastaruoju atveju vienu metu egzistuoja daug įvairios krypties ir ilgio bazių (sutrumpėja dangaus objekto stebėjimo laikas). Kosminio radijo bangų šaltinio „fotografijos" kūrimo būdas, kai pasitelkiama daugelio antenų sistema, vadinamas ***apertūrų sintezės metodu***, o pati tokia sistema – ***apertūrų sintezės teleskopu***. Įspūdingai atrodo radioteleskopų gardelė, pastatyta JAV Nju Meksiko dykumoje (**3.13** pav.). Ją sudaro 25 m skersmens parabolinės antenos, kurių iš viso yra 27 ir kurių rikiuotė primena milžiniško dydžio raidę Y: vienas jos petys gali išsitempti iki 21 km (antenos judamos). Šio apertūrų sintezės teleskopo, sutrumpintai vadinamo VLA (*Very Large Array*), skiriamoji geba 1,3 cm bangoje yra 0″,05, o tai jau pranoksta antžeminius optinius teleskopus be adaptyviosios optikos.

3.4. RENTGENO IR GAMA TELESKOPAI

Teleskopai, kuriais priimami dangaus kūnų skleidžiami infraraudonieji ir didelė dalis ultravioletinių spindulių, iš esmės nesiskiria nuo optinių teleskopų. Tiktai konstruojant infraraudonuosius teleskopus, atsižvelgiama į tai, kad jie patys yra infraraudonųjų spindulių šaltinis (reikia šaldyti), o ultravioletiniuose teleskopuose reikia tiksliau apdoroti optinius paviršius. Šiose spektro srityse pagrindinis prietaisas yra teleskopas reflektorius, o refraktorius tinka tik spinduliams, besišliejantiems prie šviesos spindulių, nes visus kitus spindulius stikliniai lęšiai sugeria. Iki 2000 m. į orbitą aplink Žemę keltų ultravioletinių ir infraraudonųjų teleskopų veidrodžių skersmenys siekė kelias dešimtis cm. Įprastinių teleskopų veidrodžių gebėjimas atspindėti elektromagnetines bangas baigiasi ties bangomis, kurių ilgis maždaug 100 nm. Vadinasi, trumpesnėms bangoms (kietiesiems ultravioletiniams, Rentgeno ir gama spinduliams) priimti reikia jau kitokios konstrukcijos teleskopų.

Rentgeno teleskopai, kaip ir radioteleskopai, būna dviejų tipų: ***veidrodiniai***, t. y. ***fokusuojantys,*** ir ***nefokusuojantys***. Rentgeno (ir kietieji ultravioletiniai) spinduliai neatsispindi nuo veidrodžio, kol kritimo kampas yra palyginti mažas (taip yra įprastuose reflektoriuose), bet kai jis priartėja prie 90° (spinduliai beveik šliaužia veidrodžio paviršiumi), atspindys nuo metalinio paviršiaus atsistato. Savitos Rentgeno spindulių atspindžio savybės sąlygoja savotišką fokusuojančio Rentgeno teleskopo objektyvo formą, primenančią vos vos siaurėjantį vamzdį.



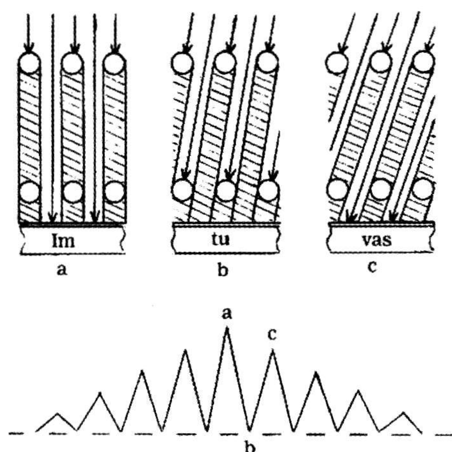
3.14 pav. *Veidrodinio Rentgeno teleskopo schema*

Pirmiausia spinduliai krinta į veidrodį, kuris yra sukimosi paraboloido dalies, esančios toli nuo jo viršūnės, pavidalo. Vienas toks veidrodis kuria netobulą, aberacijų paveiktą, Rentgeno šaltinio vaizdą, todėl už jo statomas kitas sukimosi hiperboloido segmento pavidalo veidrodis. Tiktai po dviejų atspindžių lygiagretūs Rentgeno spinduliai susitelkia į vieną teleskopo židinio plokštumos tašką, kur įrengtas spindulių imtuvas (**3.14** pav.). Kad į imtuvą nepatektų neatsispindėję spinduliai, prieš objektyvą statoma diafragma. Rentgeno teleskopo veidrodžių paviršiaus plotas yra gana didelis, tačiau dėl to, kad spinduliai krinta labai įstrižai, juos priima tik siauras žiedas aplink diafragmą. Norint padidinti teleskopo jautrį, objektyvai daromi iš kelių ar daugiau koncentriškai įterptų vienas į kitą vis mažėjančio skersmens veidrodžių. Išorinio sluoksnio cilindrinių veidrodžių skersmuo paprastai būna kelių dešimčių centimetrų ilgio. Veidrodinių Rentgeno teleskopų skiriamoji geba labai priklauso nuo atspindinčio paviršiaus kokybės. Tokius veidrodžius labai sunku pagaminti, nes jų paviršiaus šlifavimo tikslumas turi būti ne mažesnis kaip nanometro dalys. Vis dėlto XX a. pabaigoje fokusuojančių Rentgeno teleskopų skiriamoji geba priartėjo ir kartais net susilygino su antžeminių optinių teleskopų skiriamąja geba.

1999 m. į labai ištęstą orbitą aplink Žemę buvo iškeltos dvi to meto moderniausios Rentgeno observatorijos. Vieną jų, pavadintą „Chandra“ (pagerbiant indų kilmės astrofiziką S. Čandrasekarą (*S. Chandrasekhar*), pagamino JAV specialistai, kitą, pavadintą Niutono vardu, europiečiai. Pagrindinis „Chandra“ observatorijos prietaisas – didelis teleskopas Rentgeno šaltinių vaizdams ir spektrams gauti. Jo objektyvą sudaro 4 koncentriškai vienas į kitą sudėti cilindrinių veidrodžių sluoksniai (kiekviename jų – 2 veidrodžiai). Išorinio paraboloidinio veidrodžio skersmuo 1,2 m, vidinio 0,6 m, o jų ilgis 0,8 m (hiperboloidiniai veidrodžiai mažesni). Teleskopo židinio nuotolis 10 m, regėjimo laukas 0°,5. Nepaprastai tiksliai apdoroti veidrodžių paviršiai leido pasiekti net 0″,5 skiriamąją gebą. Niutono observatorijos prietaisų skiriamoji geba gerokai mažesnė (15″), tačiau jiems būdinga itin didele skverbties geba, t. y. galima stebėti daug silpnesnius Rentgeno šaltinius. Taip yra todėl, kad šioje observatorijoje atspindinčių Rentgeno spindulius paviršių bendras plotas yra labai didelis, per 120 m^2. Mat čia sujungti 3 identiški Rentgeno teleskopai, o kiekvienas jų turi net po 58 veidrodinius sluoksnius, koncentriškai išdėliotus kas keli milimetrai. Tokia veidrodžių gausa įmanoma, jeigu jie yra ploni ir lengvi. Niutono observatorijoje jie padaryti iš maždaug milimetro storio nikelio lakštų, padengtų auksu, nuo kurio ir atšoka Rentgeno spinduliai. Labai sunku tokio tipo veidrodžiams suteikti ir palaikyti reikalingo tikslumo formą – nukenčia skiriamoji geba. „Chandra“ observatorijos veidrodžiai pagaminti iš maždaug 2 cm storio stiklo, padengto iridžiu.

Kritimo kampas, kai Rentgeno spinduliai ima atsispindėti, trumpėjant bangai, visiškai priartėja prie 90°, ir fokusuojantis teleskopas pasidaro neefektyvus.

Taigi kietiesiems dangaus kūnų Rentgeno spinduliams tirti tinka tik nefokusuojantys teleskopai. Juos sudaro tiesiog spindulių imtuvas (pavyzdžiui, scintiliacinis skaitiklis) ir priešais jį stovintis ***kolimatorius***, t. y. įrenginys, praleidžiantis į imtuvą tik tam tikrų krypčių Rentgeno spindulius. Aišku, stengiamasi, kad imtuvo paviršius (langelis) būtų kuo didesnis. Teleskopo kolimatoriumi gali būti pluoštas apvalių, šešiabriaunių ar kitos formos vamzdelių. Nuo vamzdelio skersmens ir ilgio santykio priklauso, koks dangaus lopinėlis matyti nuo imtuvo paviršiaus. Geresnis kryptingumas gaunamas su plyšiniais arba vielų kolimatoriais. Dažnai naudojami vadinamieji ***moduliaciniai kolimatoriai***, kuriuos sudaro dvi lygiagrečiai ištemptų plonų (~0,1 mm) vielų plokštumos. Juose tarpai tarp vielų (lygūs vielų storiui) yra daug mažesni už atstumą tarp vielų plokštumų. Moduliacinio kolimatoriaus veikimas parodytas **3.15** pav. Matyti, kaip vielų sistema, kintant kritimo kampui, tai praleidžia spindulius, tai užstoja jiems kelią. Vadinasi, Rentgeno teleskopo su moduliaciniu kolimatoriumi kryptingumo diagrama vieloms statmena kryptimi susideda iš daugelio lapelių. Šių kampinis plotis priklauso nuo vielos storio ir atstumo tarp vielų plokštumų santykio ir būna iki keliolikos lanko sekundžių. **3.15** pav. taip pat parodytas taškinio Rentgeno šaltinio registrogramos, užrašytos teleskopu su moduliaciniu kolimatoriumi, kai jis sukasi apie lygiagrečią vieloms ašį (kai skenuoja dangų), pavyzdys. Šiek tiek pratisam šaltiniui „pjūklo“ dantys būtų ne tokie gilūs.



3.15 pav. *Viršuje – moduliacinio kolimatoriaus veikimo principas. Apačioje – imtuvo parodymų kitimo vaizdas, kai teleskopo su moduliaciniu kolimatoriumi kryptingumo diagramą pereina taškinis Rentgeno šaltinis (raidėmis pažymėtos vietos atitinka momentus, parodytus viršuje)*

Anksčiau nefokusuojantys teleskopai dažnai buvo reikalingi ir minkštųjų Rentgeno spindulių diapazone.

Teleskopai minkštiesiems gama spinduliams registruoti mažai skiriasi nuo nefokusuojančiųjų Rentgeno teleskopų, tačiau kietųjų gama spindulių teleskopai veikia jau kitaip. Čia, pavyzdžiui, gama kvantas krinta ne tiesiog į imtuvą, bet į konverterį (švino plokštelę), kuriame jis virsta elektrono ir pozitrono pora. Specialus detektorius (pvz., kibirkštinė kamera) fiksuoja ne tiktai šių dalelių pasirodymą, bet ir jų judėjimo kryptį, o ši maždaug atitinka paties gama kvanto judėjimo kryptį. Taigi tokio tipo gama teleskopų skiriamąją gebą sąlygoja pats kvantų registravimo būdas. Apskritai gama teleskopų skiriamoji geba labai menka – retai

1–2°, daugiausia 5–10°. Didžiausia ir moderniausia XX a. orbitinė gama spindulių observatorija, pavadinta žymaus amerikiečių fiziko Komptono (*A. Compton*) vardu, buvo paleista JAV 1991 m. Jos teleskopai sudarinėjo astronominių gama šaltinių vaizdus, tyrė jų spektrus, ieškojo naujų silpnų šaltinių. Imtuvai (paprastai scintiliatoriai) galėjo registruoti gama kvantus labai plačiame energijų intervale, nuo 20 keV iki 30 GeV.

Rentgeno ir gama teleskopų imtuvai dar registruoja pašalines didelės energijos elektringąsias daleles, kurių kosminėje erdvėje apstu. Kad nebūtų šių trukdžių, teleskopų imtuvai apgaubiami papildomais detektoriais, kurie yra jautrūs dalelėms, bet nereaguoja į priimamos spinduliuotės kvantus. Vienu metu gautus imtuvo ir papildomo detektoriaus parodymus teleskopo automatika atmeta kaip melagingus (antisutapimų metodas).

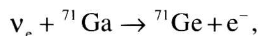
3.5. NEUTRININIAI TELESKOPAI

Neutrinai itin silpnai sąveikauja su medžiaga, todėl jiems registruoti reikia ypatingų priemonių. Tos priemonės dar priklauso nuo neutrinų energijos, nes ji lemia sąveikos su medžiaga mastą – didėjant neutrinų energijai sąveika stiprėja. Štai, pavyzdžiui, neutrinams, kurių energija mažesnė už 1 MeV, Žemė skaidri, o kai energija didesnė negu 1 TeV, ji tampa ekranu.

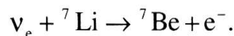
Kaip žinoma, yra elektroniniai, miuoniniai ir tauoniniai neutrinai (ir antineutrinai). Elektroniniams neutrinams gaudyti tinka, pavyzdžiui, jų sukeliamos **branduolinės reakcijos**:



$$\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \rightarrow {}^{37}\mathrm{Ar} + e^-,$$



$$\nu_e + {}^{71}\mathrm{Ga} \rightarrow {}^{71}\mathrm{Ge} + e^-,$$



$$\nu_e + {}^{7}\mathrm{Li} \rightarrow {}^{7}\mathrm{Be} + e^-.$$

Šių tipų reakcijos naudojamos elektroninių neutrinų srautui, atsiradusiam Saulės (kitos žvaigždės per toli) gelmėse (energija iki 14 MeV: žr. **5.28**) ir sprogstant supernovai (energija apie 12 MeV: žr. **5.23**), matuoti. Praktiniam tokios idėjos įgyvendinimui reikia labai didelio pasirinktos medžiagos (chloro, galio ar ličio) kiekio – nuo dešimčių iki tūkstančių tonų, nes neutrinų sąveika su medžiagos atomu yra labai reta. Be to, visa tai turi būti įrengta giliai po žeme (šachtose, kalnų tuneliuose), kad kuo mažiau trukdytų kosminių spindulių dalelės. Labai svarbi minėtose reakcijose atsiradusių naujų atomų (argono, germanio ar berilio) surinkimo ir suskaičiavimo procedūra, juk jų susidaro labai mažai. Tam yra sukurti originalūs metodai.

Pirmasis neutrinų detektorius (pagal paskirtį tai neutrininis teleskopas) Saulei tirti buvo įrengtas 1967 m. 1480 m gylio šachtoje (JAV). Jį sudaro 390 000 litrų talpos bakas pripildytas 610 tonų perchloretileno (C_2Cl_4). Per tam tikrą laiką neutrinų poveikyje susikaupusius argono atomus pagauna per

baką leidžiamos helio dujos, o toliau juos sugeria specialiai paruoštas filtras. ^{37}Ar izotopas yra radioaktyvus, ir, kai jis skyla, išlekia pozitronas ($^{37}Ar \rightarrow {}^{37}Cl + e^+ + \nu_e$). Pastarąjį užfiksuoja elektringųjų dalelių skaitiklis. Užregistruotų įvykių skaičius atitinka surinktų argono atomų skaičiui. Kad šiame Saulės neutrinų chloro-argono detektoriuje įvyktų viena branduolinė reakcija (atsirastų vienas argono atomas), reikia laukti vidutiniškai dvi paras! Argono atomai surenkami maždaug po 100 parų ekspozicijos.

Pasaulyje įrengti ir veikia taip pat galio-germanio bei ličio-berilio neutrininiai teleskopai.

Kartais neutrinų taikiniu imamas paprastas vanduo. Neutrinų sąveikoje su vandeniu atsiranda greitos elektringosios dalelės, kurias skaidrioje terpėje jau įmanoma aptikti pagal jų sukeltą Čerenkovo švytėjimą (jis susidaro judant dalelei greičiu, didesniu už šviesos greitį toje medžiagoje). **Vandens detektoriuose** greiti elektronai atsiranda vykstant jų tampriajai sklaidai nuo elektroninių neutrinų ($\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$). Šis procesas parankus Saulei tirti, nes ji gausiai pažeria elektroninių neutrinų. Be to, kai elektroninis antineutrinas ($\tilde{\nu}_e$) susiduria su protonu, vandenyje pasirodo greitas pozitronas ($\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$). Ši reakcija tinka supernovų sprogimui tirti, nes tuo metu turi rastis daug maždaug 15 MeV energijos elektroninių antineutrinų (Saulėje jų nėra). Vadinamuose **scintiliaciniuose detektoriuose** naudojami kitokie skysčiai (pavyzdžiui, CH_2).

Rezervuarai su dideliu skysčio kiekiu taip pat dedami giliai po žeme. Šviesos blyksnius juose fiksuoja išdelioti aplink fotoelektroniniai daugintuvai. Įspūdingas požeminis neutrininis teleskopas (Super-Kamiokande) pastatytas Japonijoje: 600 m gylio šachtoje detektoriaus talpyklose yra net 50 000 tonų vandens, o žybsnių „laukia“ 13 000 fotoelektroninių daugintuvų.

Yra neutrininių teleskopų, veikiančių dar kitokiais, negu paminėti, principais. Atskirą problemą sudaro labai didelės energijos (>1 GeV) neutrinų registravimas.

Labai didelės energijos neutrinai atsiranda susidūrus reliatyvistiniu greičiu judančiai dalelei (pavyzdžiui, protonui) su atomo branduoliu ar fotonu. Beje, po susidūrimo iš pradžių atsiranda kitokios dalelės, o neutrinai pasirodo tiktai šių antrinių dalelių virsmų grandinės pabaigoje. Taigi sritys, kuriose apstu labai greitų dalelių ir yra jas stabdančios medžiagos ar fotonų, turi būti didelės energijos neutrinų šaltiniai. Jais gali būti aktyvūs galaktikų branduoliai, dujų ir dulkių apsuptyje esantys pulsarai ir juodosios skylės, supernovų apvalkalai ir t. t. Tokius neutrinus pažeria ir Saulės atmosfera, nes į ją nuolat sminga tarpžvaigždiniai kosminiai spinduliai. Aišku, šie spinduliai pataiko ir į Žemės atmosferos daleles. Taigi neutrinai randasi čia pat, šalia mūsų. „Savi“ neutrinai sudaro foną, trukdantį tolimų neutrinų šaltinių paieškai ir tyrimui.

Labai didelės energijos (50–1000 GeV) miuoniniams neutrinams regist-

ruoti gerai tinka **giliavandeniai detektoriai.** Kai toks neutrinas sąveikauja su medžiaga (atomo branduoliu), atsiranda miuonas ($\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$, čia N – nukleonas, X – kiti reakcijos produktai). Miuono kelią medžiagoje lydi fotonų ir elektringų dalelių liūtis, o greiti elektronai ir pozitronai sukelia Čerenkovo švytėjimą. Taigi reikiamai išrikiuoti šviesos imtuvai vandenyje gali ne tik užfiksuoti miuono pasirodymą, bet ir nustatyti jo judėjimo kryptį bei energiją. Tokios rūšies neutrininiai teleskopai gali būti įrengiami tiesiog gamtiniuose vandens telkiniuose (giliuose ežeruose, jūrose). Pastaruoju atveju tereikia giliai į vandenį panardinti didžiulę, gal net apie 1 km^3 tūrio erdvinę gardelę, sudarytą iš tūkstančių gerai apsaugotų fotoelektroninių daugintuvų. Miuonas vandenyje nulekia 1–3 km, t. y. perskrodžia visą detektorių. Todėl lengviau nubrėžti jo judėjimo trajektoriją, o tai labai svarbu, nes miuonas juda ta pačia kryptimi kaip jį sukūręs neutrinas. Vadinasi, neutrininis teleskopas irgi „žino“ kurioje dangaus vietoje yra atlėkusio neutrino šaltinis. Šio tipo neutrininių teleskopų skiriamoji geba apie 1°.

Patogiausia stebėti tuos neutrinų šaltinius, kurie atsiduria priešingoje Žemės pusėje negu stebėtojas. Juk Žemės rutulys neutrinams yra skaidrus. Tokio neutrino sukurtas miuonas detektorių perkerta iš apačios į viršų. Jo nesupainiosi su Žemės atmosferoje atsirandančiais miuonais, kurie sudaro difuzinį foną, trukdantį stebėjimams.

Giliavandeniai neutrinų detektoriai projektuojami ar jau statomi Baikalo ežere, Viduržemio jūroje ties Graikijos ir Prancūzijos krantais, bei Antarktidos ledynuose (šviesos imtuvai skaidraus ledo gręžiniuose).

Ypač didelės energijos (per 10 PeV) neutrinams registruoti yra dar viena galimybė. Jų saveikoje su medžiaga atsiranda elektringų dalelių liūtis. Staigus įkaitusio liūties kanalo (kelių cm skersmens ir kelių m ilgio) plėtimasis sukelia akustinę bangą. Taigi dabar vietoje šviesos imtuvų į vandenį reikia gramzdinti gardelę iš hidrofonų (pjezoelektrinių daviklių).

Neutrininėse observatorijose, be astronominės krypties darbų, dar atliekami įvairūs branduolio ir elementariųjų dalelių fizikos eksperimentai.

3.6. SPINDULIUOTĖS IMTUVAI

Vienaip ar kitaip elektromagnetinės bangos sąveikauja su medžiaga, ir tai suteikia galimybę jas aptikti bei registruoti. Šios sąveikos pobūdis priklauso nuo medžiagos savybių ir nuo bangos ilgio. Norint aprėpti visą elektromagnetinių bangų spektrą, reikia turėti įvairių rūšių imtuvų. Geras imtuvas ne mažiau svarbus kaip geras teleskopas. Imtuvą apibūdina **kvantinis našumas** (dydis, rodantis kritusių kvantų dalį, kuri „naudingai“ paveikė imtuvą), **spektrinis jautris**, **skiriamoji geba**, **tiesiškumas** ir kt.

Panagrinėkime labiau paplitusius imtuvus.

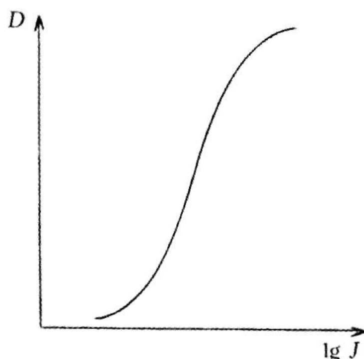
3.6.1. Akis ir šviesulių spindesys

Iki XIX a. vidurio žmogaus akis buvo vienintelis šviesos imtuvas. Dabar ji astronominiuose tyrimuose mažai naudojama. Kiekvieno žmogaus akis šiek tiek skiriasi, todėl kalbama apie vidutinę akį. Vidutinė akis dieną jaučia elektromagnetines bangas nuo 390 iki 760 nm, o jautriausia yra 555 nm bangai (žalia šviesa). Naktį, t. y. esant silpnai apšvietai, regos mechanizmas persitvarko, ir akies spektrinio jautrio kreivė pasislenka trumpesniųjų bangų link (kreivės maksimumas atsiduria ties 513 nm banga). Akies kvantinis našumas apie 10%, skiriamoji geba apie 1′.

Hiparchas II a. prieš Kristų matomas akimi žvaigždes suskirstė į šešias klases – ***ryškius***: šviesiausios (didžiausio spindesio) žvaigždės buvo priskirtos pirmajam, o blyškiausios – šeštajam ryškiui. XIX a., atsiradus objektyvioms matavimo priemonėms – fotometrams, buvo nustatyta, kad subjektyviai įvertintą **vieno ryškio skirtumą atitinka *apšvietų* (*spindesių*) santykis, lygus 2,51189**. Jeigu santykis lygus 100, – ryškiai skiriasi penkiais vienetais. Ryškių skalė yra santykinė – atskaitos pradžia pasirenkama susitarimu (plačiau žr. **5.3**).

3.6.2. Fotografinė emulsija

Fotografinę emulsiją sudaro vidutiniškai 1 μm skersmens sidabro halogenido (dažniausiai sidabro bromido) kristalai, pasklidę želatinoje, kuri plonu sluoksniu užliejama ant stiklinės plokštelės, skaidrios lanksčios plėvelės – filmo ar popieriaus. Krintant šviesai į emulsiją, joje vyksta fotocheminės reakcijos ir susidaro atvaizdo užuomazga. Atvaizdas išryškėja chemiškai apdorojus emulsiją, kai šviesos paveikti emulsijos kristalai virsta metalinio sidabro grūdeliais (emulsija pajuosta). Šviesos nepaveikti kristalai pašalinami specialiu tirpikliu – fiksažu.



3.16 pav. *Fotografinės emulsijos charakteristikos kreivė*

Nors ir fotografinės emulsijos jautris yra mažas (kvantinis našumas ne didesnis kaip 1%), fotografuoti galima labai silpnus šviesulius. Emulsijai būdinga savybė kaupti krintančią energiją: kuo ilgesnė ekspozicijos trukmė, tuo silpnesni objektai užfiksuojami. Sidabro bromido emulsijos jautrios elektromagnetinėms bangoms nuo 500 nm iki pat gama spindulių. Ilgesnėms bangoms emulsija pasidaro jautri, kai į ją įdedama optinių sensibilizatorių (dažų). Emulsija, jautri iki 600 nm, vadinama **ortochromatine**, iki 700 nm – **panchromatine** ir iki

1300 nm – **infrachromatine**. Astronomijai gaminamos specialios emulsijos, pajautrintos mažai apšvietai (ilgai ekspozicijai).

Po ryškinimo emulsijoje atsiradę metalinio sidabro grūdeliai sąlygoja atvaizdo grūdėtą struktūrą. Dėl to fotografijos skiriamoji geba ribota. Tai labiausiai pastebima naudojant didelio jautrumo emulsijas, nes jose šviesai jautrūs kristalai yra didesni. Apskritai žvaigždžių atvaizdai dangaus fotografijose yra daug didesni už jų difrakcinius atvaizdus, kuriamus teleskopo optikos, nes emulsija sklaido šviesą, ir, be to, ji fiksuoja atmosferos turbulencijos sukeltus žvaigždės padėties svyravimus.

Moksliniams tyrimams vartojami tiktai negatyvai. Fotografinį šviesos (ar kitos spinduliuotės) poveikį apibūdina negatyvo ***pajuodavimas*** arba atvaizdo ***optinis tankis***

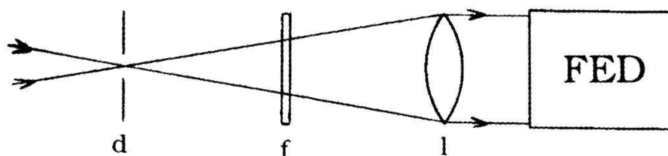
$$D = \lg \frac{I_0}{I}, \qquad (3.7)$$

čia I_0 – kritusio į negatyvą šviesos pluoštelio intensyvumas, I – praėjusios pro negatyvą šviesos intensyvumas. Optinis tankis matuojamas mikrodensitometrais. Kai fotografija taikoma fotometrijoje, reikia nustatyti, kaip atvaizdo optinis tankis priklauso nuo apšvietos J. Grafikas, vaizduojantis optinio tankio D priklausomybę nuo $\lg J$, vadinamas ***charakteristine kreive*** (3.16 pav.) Jai sudaryti fotografuojami laboratoriniai ar astronominiai šviesos šaltiniai su žinomais jų sukeltų apšvietų santykiais.

Dėl charakteristinės kreivės netiesiškumo, jos pavidalo priklausomybės nuo ekspozicijos, šviesos bangos ilgio bei apdorojimo sąlygų, emulsijos sluoksnio nevienodo jautrio, atvaizdo grūdėtumo mažėja fotografinių fotometrinių matavimų tikslumas, kuris retai būna didesnis kaip 5–7%. Tačiau fotografinis tyrimo metodas labai parankus tuo, kad vienoje fotografijoje užregistruojama daug šviesulių ar šviesulio detalių. Be to, fotografijos išlieka ilgam laikui, ir pagal jas galima sekti kitimus, vykstančius dangaus sferoje. Fotografija ypač tinka astrometrijoje.

3.6.3. Fotoelektriniai imtuvai

Šių imtuvų veikimas pagrįstas išoriniu arba vidiniu **fotoefektu**. **Fotoelementuose** su išoriniu fotoefektu iš katodo išmušti elektronai lekia tiesiog į anodą, o **fotoelektroniniuose daugintuvuose** fotoelektronų srautas dar yra didinamas antrine elektronų emisija iš tarpinių elektrodų – dinodų. Elektros srovės, atsiradusios šių prietaisų grandinėse, yra tiesiog proporcingos krintančiam į fotokatodą spinduliuotės energijos srautui. Fotokatodai padengiami medžiagomis, kurių elektronų išlaisvinimo darbas yra mažas. Dažniausiai naudojami deguonies-sidabro-cezio ir stibio-cezio junginių fotokatodai. Jų kvantinis našumas 10–30%. Pagaminti fotokatodų, kurie būtų jautrūs ilgesnėms kaip 1,2 μm bangoms, jau nepavyksta.



3.17 pav. *Optinė fotoelektrinio fotometro schema*

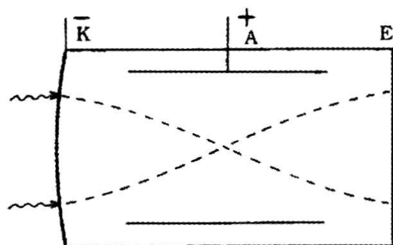
Fotometrai su fotoelektroniniu daugintuvu yra tikslios astrofotometrijos prietaisai. Jais žvaigždžių spindesys nustatomas 1%, o kartais ir didesniu tikslumu. Supaprastinta elektrofotometro schema pateikiama **3.17** pav. Čia *d* – diafragma, įtaisyta teleskopo objektyvo židinyje ir išskirianti tiriamąjį šviesulį, *f* – šviesos filtras, praleidžiantis tam tikrų bangų ilgių spindulius, *l* – vadinamasis Fabri lęšis; jis ant fotokatodo projektuoja tiriamojo šviesulio apšviesto objektyvo atvaizdą, FED – fotoelektroninis daugintuvas (maitinimo ir registravimo bei kiti pagalbiniai įrenginiai neparodyti). Astronomijoje fotoelektriniai fotometrai dažnai naudojami kaip ***fotonų skaitikliai***, t. y. jie rodo ne fotosrovę, bet skaičiuoja impulsus, kuriuos sukelia prietaise atskiri fotoelektronai. Jeigu elektrofotometre prieš FED įstatomas analizatorius (pvz., Nikolio prizmė), tai, jį sukant apie spindulių pluoštelio ašį, pagal prietaiso parodymų kitimą galima spręsti apie šviesos poliarizacijos laipsnį ir kryptį. Šios paskirties prietaisai vadinami ***poliarimetrais***.

Įprastu fotodaugintuvu vienu metu galima stebėti tik vieną šviesulį. Šio trūkumo neturi ***panoraminiai fotoelektriniai prietaisai***. Vienas tokių prietaisų yra vadinamoji ***mikrokanalinė plokštelė***. Už pusiau skaidraus fotokatodo yra maždaug 1 mm ilgio labai plonų (apie 25 μm skersmens) truputį išlenktų vamzdelių pluoštas. Šie vamzdeliai yra tarsi miniatiūriniai fotodaugintuvai, kuriuose antriniai elektronai atsiranda nuo elektronų smūgių į vamzdelio sieneles. Įrenginio, esančio už vamzdelių sistemos, paviršių pasiekia nevienodas elektronų srautas, priklausantis nuo į fotokatodą krintančios spinduliuotės pasiskirstymo.

Kitaip veikia kitas elektroninis vaizdo stiprintuvas – ***elektroninis optinis keitiklis***. Tai vakuuminis vamzdelis, kurio viename gale yra fotokatodas, o kitame – liuminescencinis ekranas (**3.18** pav.). Vamzdelio vidų užima elektroninis lęšis. Kai į fotokatodą krinta teleskopo kuriamas šviesulio optinis atvaizdas, elektroninis lęšis iš emituotų fotoelektronų ties ekranu formuoja šviesulio elektroninį atvaizdą. Greitų elektronų smūgiai sukelia ekrano švytėjimą, ir jame matyti vėl optinis šviesulio atvaizdas, tiktai daug stipresnis. Elektroninio optinio keitiklio ekranas švyti ir tada, kai fotokatodą apšviečia šiaip akiai nematomi spinduliai.

Elektroninio optinio keitiklio ekrane susidariusį atvaizdą galima stebėti arba fotografuoti. Galima iš viso atsisakyti ekrano – vietoj jo naudoti specialią elektronų smūgiams jautrią fotoemulsiją. Toks elektroninio atvaizdo tie-

sioginio fotografavimo prietaisas vadinamas ***elektronografinė kamera***. Fotografuojant su ja šviesulius, ekspozicijos trukmė sumažėja daug kartų (palyginanti su įprastu fotografavimu to paties teleskopo židinio plokštumoje). Kitas svarbus elektroninės fotografijos privalumas – charakteristinės kreivės tiesiškumas dideliame apšvietų intervale. Tačiau elektronografinę kamerą eksploatuoti nėra paprasta (ypač keblu eksponuotą emulsiją pakeisti nauja, nes tuo momentu fotokatodas turi išlikti vakuume – kitaip suges), ir ji astronomijoje praktiškai nebenaudojama.



3.18 pav. *Elektroninio optinio keitiklio schema: K – fotokatodas, A – anodas (elektroninis lęšis), E – ekranas. Parodyta kai kurių fotolektronų trajektorijos*

Apšvietus puslaidininkius, juose padaugėja elektros krūvininkų, t. y. sumažėja jų elektrinė varža. Šiuo vidinio fotoefekto reiškiniu pagrįsti spinduliuotės imtuvai vadinami ***fotorezistoriais***. Jie ypač gerai tinka infraraudoniesiems spinduliams registruoti. Tą patį galima pasakyti apie kito tipo imtuvus – ***ventilinius fotoelementus***. Jų veikimo principas – užtvarinis fotoefektas, t. y. elektrovaros jėgos atsiradimas metalo ir puslaidininkio arba dviejų puslaidininkių sandūroje, kai į ją krinta spinduliai.

Labai dideliu (artimu 100%) kvantiniu našumu bei kitomis puikiomis savybėmis pasižymi vadinamieji ***krūvių sąsajos įtaisai***, t. y. panoraminiai šviesos imtuvai, pagrįsti vidiniu fotoefektu. Juos sudaro daugybė (gali būti milijonai) eilutėmis išdėstytų 10–30 mikrometrų dydžio sluoksniuotos struktūros (metalas–dielektrikas–puslaidininkis) elementų. Į puslaidininkį (silicį) patekus šviesos fotonui, jame susidaro elektrono ir skylės pora. Atsirandančius elemente elektronus galima kaupti. Kadangi sukaupto elektrinio krūvio dydis priklauso nuo sugertų fotonų skaičiaus, tai, išmatavus jį visuose elementuose, galima atkurti stebimo objekto vaizdą. Nuo vieno elemento prie kito, taigi ir prie išėjimo, krūvis perkeliamas nuosekliai keičiant elementų potencialą. Visa informacija perduodama į kompiuterio atmintį, ir jo ekrane galima pamatyti stebėtų šviesulių atvaizdus.

Tokios rūšies imtuvų jautrus paviršius negali būti labai didelis. Antai dažnai naudojamų vienų didžiausių įtaisų paviršiaus plotas tėra apie 10 cm^2 (2048 × 2048 15 μm elementai). Norint padidinti imtuvo apimtį, t. y. tuo pat metu stebėti didesnę dangaus sritį, daroma mozaika iš kelių įtaisų. Krūvių sąsajos įtaisai reaguoja į plačią spektro sritį, būtent nuo 0,3 iki 1,1 μm. Šiluminės kilmės krūviams mažinti įtaisai šaldomi maždaug iki –100 °C.

Modernūs krūvių sąsajos įtaisai tapo pagrindiniais optinės spinduliuotės imtuvais astronomijoje ir kilstelėjo ją į aukštesnį lygį. Didelis jų jautris „atgaivino“ mažesnius teleskopus, su jais dabar galima stebėti šviesulius, kurie

anksčiau buvo prieinami tik daug didesniems instrumentams. Sutrumpintai šie imtuvai pasaulyje vadinami *CCD* (*Charge Coupled Devices*).

Panašų ūgtelėjimą patyrė ir infraraudonųjų spindulių astronomija, kuomet ir šiai sričiai buvo sukurti panoraminiai imtuvai, panašūs į CCD, tiktai su kai kuriais konstrukcijos ir elektrinio krūvio nuskaitymo vaizdo elemente skirtumais. Šiuo atveju jautrių mažos energijos fotonams 10–40 μm dydžio elementų pagrindą sudaro kristalinės puslaidininkinės medžiagos su maža draustinės juostos energija (germanis, indžio stibidas, švino sulfidas, silicis + arsenas ir kt.). Infraraudonųjų spindulių vaizdo kameros šaldomos iki temperatūros, žemesnės už 100 K, o prietaisai jautrūs maždaug 100 μm ilgio bangoms vėsinami iki 4 K (skystas helis).

3.6.4. Kiti imtuvai

Dar vieną spinduliuotės imtuvų grupę, labai reikalingą ilgabangei infraraudonųjų spindulių daliai, sudaro imtuvai, kurių veikimas pagrįstas medžiagos įšilimu, kai ji sugeria krintančių elektromagnetinių bangų energiją. Tam tikrą imtuvo temperatūros padidėjimą galima susekti pagal kai kurių jo savybių pokytį. ***Bolometruose*** šilumos poveikis nustatomas pagal metalo ar puslaidininkio varžą, ***termoelementuose*** – pagal atsiradusią grandinėje termoelektrovaros jėgą, ***radiometruose*** – pagal molekulių greitį, ***pneumatiniuose detektoriuose*** – pagal dujų slėgį, ***piroelektriniuose imtuvuose*** – pagal piroelektriko paviršiaus krūvį. Visi tie imtuvai yra neselektyvūs, t. y. jų jautrumas nepriklauso nuo bangų ilgio. Astronomijoje tebenaudojami tik puslaidininkiniai bolometrai.

Rentgeno astronomijoje naudojami CCD ar mikrokanalinių plokštelių tipo imtuvai bei scintiliaciniai skaitikliai ir proporcingieji skaitikliai. Pastarieji yra panašūs į Geigerio ir Miulerio skaitiklius, tiktai impulso amplitudė jų išėjime yra proporcinga fotono energijai, t. y. jais galima tirti Rentgeno spindulių energijos spektrą.

Gama spindulių šaltiniams tirti naudojami scintiliaciniai skaitikliai, taip pat Čerenkovo skaitikliai bei kibirkštinės kameros (žr. 3.4).

3.7. SPEKTRINIAI PRIETAISAI

Dideli teleskopai visada turi prietaisus šviesulių spektrams gauti. Įprastinį spektrinį prietaisą sudaro ***kolimatorius***, ***šviesą skaidantis elementas*** ir ***kamera***. Kolimatorius šviesos šaltinio (pavyzdžiui, apšviesto plyšio) spindulius lygiagrečiu pluoštu nukreipia į skaidantį įrenginį, o kameros objektyvas išskaidytus monochromatinius pluoštus surenka į ***spektrą*** (šaltinio monochromatinių atvaizdų seką). Jeigu šviesą skaido prizmė, spektrinis prietaisas vadinamas ***prizminiu***, o jeigu difrakcinė gardelė – ***difrakciniu***. Prietaisai, kuriuose

spektras fotografuojamas, vadinami ***spektrografais***, o kai spektras registruojamas fotoelektriniu imtuvu – ***spektrometrais***.

Kameros objektyvo židinio plokštumoje susidariusio spektro mastelį apibūdina ***tiesinė dispersija*** $dl/d\lambda$; čia dl – spektro ilgis, atitinkantis bangų ilgių intervalą $d\lambda$. Ji matuojama milimetrais nanometrui (mm/nm). Prizminio spektro tiesinė dispersija priklauso nuo prizmės (prizmių) laužiamojo kampo, bangos ilgio (ilgėjant bangai, dispersija mažėja) ir kameros objektyvo židinio nuotolio. Su difrakcine gardele, kaip žinoma, gaunamas ne vienas spektras, bet daugelio eilių spektrai. Jų tiesinė dispersija proporcinga spektro eilei, kameros židinio nuotoliui, gardelės rėžių skaičiui milimetre ir nepriklauso nuo bangos ilgio. Praktikoje tiesinę dispersiją labiau įprasta matuoti nanometrais milimetrui (nm/mm).

Kita svarbi spektrinio prietaiso savybė – ***skiriamoji geba***, t. y. santykis $\lambda/\Delta\lambda$; čia $\Delta\lambda$ – mažiausias bangų ilgių intervalas tarp spektro linijų, kurias dar išskiria prietaisas.

Astrofizikoje svarbiausias spektrinis prietaisas yra spektrometras su atspindžio difrakcine gardele. Prizmėse dėl atspindžių ir sugerties susidaro nemaži šviesos nuostoliai, be to, dėl nevienodos prizminių spektrų dispersijos juos sunkiau apdoroti. Tiesa, šiaip difrakcinės gardelės išsklaido šviesą po visų eilių spektrus, bet parinkus tam tikrą gardelės rėžių formą pavyksta didelę dalį šviesos energijos sukoncentruoti kurioje nors vienoje spektro eilėje.

Spektrinių prietaisų konstrukcija, dispersija, skiriamoji geba priklauso nuo teleskopo, prie kurio jie statomi, dydžio ir optinės sistemos, nuo to, kokiems objektams (Saulei, ūkams, didelio ar mažo spindesio žvaigždėms ir t. t.) tirti jie skiriami. Blyškių žvaigždžių šviesos užtenka tiktai trumpiems, t. y. mažos tiesinės dispersijos, spektrams gauti. Kartais tenka apsiriboti maždaug 100 nm/mm tiesine dispersija ir skiriamąja geba, lygia 10–100. Tačiau su prietaisais Saulei tirti gaunami spektrai, kurių tiesinė dispersija maždaug 0,01 nm/mm, o skiriamoji geba 10^6. Sukonstruoti specialūs spektriniai prietaisai – ***spektroheliografai***, kuriais Saulė fotografuojama tam tikroje monochromatinėje šviesoje.

Spektriniai prietaisai tvirtinami prie teleskopo taip, kad jų plyšys būtų teleskopo objektyvo židinio plokštumoje ir į jį patektų šviesulio (ar jo dalies) atvaizdas. Deja, dėl nepaliaujamo atmosferos sluoksnių judėjimo šviesulio atvaizdas išplinta, virpa, ir ne visa teleskopo surinkta šviesa pataiko į plyšį. Taigi atsiranda dideli energijos nuostoliai, mažinantys prietaiso skverbties gebą. Kada svarbiau silpnos žvaigždės, o ne spektro kokybė, stebima su beplyšiu prietaisu. Šiuo atveju lygiagretų spindulių pluoštą formuoja šiek tiek pakeista teleskopo optinė sistema.

Savotišku spektrografu tampa visas teleskopas, kai prieš jo objektyvą pastatoma tokių pat matmenų mažo laužiamojo kampo prizmė, vadinamoji ***objektyvinė prizmė***. Tuo atveju kamerą atstoja pats teleskopas, o kolimatorius

iš viso nebūtinas, nes dangaus šviesuliai yra labai toli, ir jų spinduliai praktiškai yra lygiagretūs. Oro srovės, teleskopo valdymo netikslumai užglaisto ir šiaip mažos skiriamosios gebos spektrų smulkesnes detales, tačiau svarbu tai, kad tokiu įrenginiu iš karto nufotografuojami viso dangaus sklypo, kurį aprėpia teleskopas (kamera), pakankamo spindesio šviesulių spektrai. Objektyvinės prizmės tinka dangaus apžvalgos darbams, žvaigždžių spektrų klasifikacijai ir kt. Jos gaminamos teleskopams (fotografiniams), kurių skersmenys ne didesni kaip 1 m.

Sparčiai plinta vienalaikio daugelio šaltinių tikslaus spektroskopinio stebėjimo metodas. Čia pasitelkiami šviesolaidžiai. Vieni jų galai specialia įranga nutaikomi į teleskopo židinio plokštumoje esančius reikiamų šviesulių atvaizdus, o kiti galai nukreipiami į vieno spektrometro ilgą plyšį. Taigi vienu sykiu gaunami daugelio (gali būti net šimtų) šviesulių spektrai.

Pačių trumpiausių elektromagnetinių bangų skaidai tinka spektrometrai su erdvine kristaline gardele. Radijo bangų spektrai sudėliojami pagal atskirus matavimus atskiruose dažniuose.

Astronomijoje dažnai reikia išskirti tam tikrą šviesos spektro dalį. Tam yra ***šviesos filtrai***. Dažniausiai tai – spalvotieji stiklai (sugerties filtrai). Paprastai tokio stiklo pralaidumo juosta labai plati – šimtai nanometrų. Norint išskirti daug siauresnį spektro ruožą, reikia kelių skirtingų filtrų, bet tada labai sumažėja bendras pralaidumas. Kelių nanometrų juostą išskiria interferenciniai filtrai, kurių veikimas pagrįstas šviesos interferencija tarp dviejų lygiagrečių pusiau skaidrių paviršių. Dar siauresnis bangų ilgių ruožas (~0,1 nm) praeina pro sudėtingos struktūros interferencinius-poliarizacinius filtrus.

4
SKYRIUS

SAULĖS SISTEMOS KŪNŲ FIZIKA

Aloyzas Pučinskas

4.1. PLANETŲ TYRIMO METODAI

4.1.1. Fotometriniai tyrimai

Lengviausia išmatuoti bendrą planetos (palydovo) ***spindesį***. Jis priklauso nuo planetos nuotolio iki Žemės ir Saulės (planeta švyti išsklaidyta Saulės šviesa), nuo planetos paviršiaus, jos atmosferos savybių ir nuo planetos fazės, t. y. matomos iš Žemės apšviestojo planetos pusrutulio dalies dydžio. Pagal planetos spindesį įvairiose fazėse, kai yra žinomi jos matmenys, nustatomas labai svarbus dydis – planetos ***sferinis albedas*** A_s, t. y. dydis, kuris parodo, kokią krintančios į planetą Saulės šviesos dalį ji išsklaido į visas puses. Kitaip tariant,

$$A_s = \frac{F}{F_0},$$

čia F_0 – krintantis Saulės spinduliuotės srautas, o F – planetos išsklaidytos spinduliuotės srautas. Žemės sferinis albedas nustatomas pagal tai, kaip ji apšviečia naktinę Mėnulio pusę, t. y. pagal vadinamąją **peleninę Mėnulio šviesą**.

Planetų paviršiai ir atmosferos labai nevienodai sugeria ir sklaido įvairių bangų ilgių šviesą, todėl sferinis albedas smarkiai priklauso nuo bangos ilgio. Integralinis planetų sferinis albedas kinta nuo 0,07 (Merkurijus) iki 0,76 (Venera). Apskritai gerai atspindi Saulės šviesą tos planetos, kurios turi storą atmosferą. Žemės albedas smarkiai priklauso nuo debesuotumo, o vidutinė jo reikšmė – 0,36.

Labai naudinga atskirų planetos **paviršiaus darinių fotometrija**. Jeigu planeta neturi atmosferos, tai pagal fotometrinius matavimus galima įvertinti tų darinių gebėjimą atspindėti šviesą, o iš to spręsti apie jų prigimtį, pavyzdžiui, ieškant medžiagų su panašiomis fotometrinėmis savybėmis Žemėje. Šviesos

sklaida atmosferoje (jeigu ji yra) keičia apšviestumo sąlygas planetos paviršiuje – šviečia ne tik Saulė, bet ir visas dangus, be to, atsispindėjusi nuo paviršiaus šviesa vėl sklaidoma atmosferoje. Todėl planetų su atmosfera fotometrinius duomenis interpretuoti labai sunku. Žinant sferinį albedą, spindesio priklausomybę nuo fazės ir dar pridėjus planetų skritulio tamsėjimo į kraštus (žr. **5.13** poskyrį) matavimus, pavyksta įvertinti aerozolių (kietų ir skystų dalelyčių) gausumą planetos atmosferoje, o kartais ir pačios atmosferos dydį. Daug papildomos informacijos gaunama stebint planetos paviršių pro įvairius šviesos filtrus (**kolorimetrija**).

Fotometrinius rezultatus papildo planetos paviršiaus ir atmosferos išsklaidytos šviesos **poliarizacijos** laipsnio tyrimai įvairiose planetos skritulio vietose. Poliarizacijos laipsnis priklauso nuo paviršiaus savybių ir nuo pakibusių atmosferoje dalelių matmenų, tačiau ir šiuo atveju stebėjimo duomenų teorinė interpretacija taip pat labai paini.

4.1.2. Spektro tyrimai

Daugiausia informacijos apie planetą teikia jos ***spektras***. Saulės šviesa, kuri atsispindi nuo planetos paviršiaus ir pasiekia Žemę, būna du kartus prasiskverbusi pro planetos atmosferą. Sklindančios atmosfera Saulės spinduliuotės spektras pakinta – šviesa įvairiose spektro srityse skirtingai išsklaidoma, atomai ir molekulės sugeria energiją – spektre pasirodo naujos sugerties linijos ir juostos. Pagal jas galima daryti išvadą apie planetos atmosferos cheminę sudėtį. Deja, stebėtojui, esančiam ant Žemės paviršiaus, trukdo Žemės atmosfera, kurioje taip pat susidaro sugerties linijos ir juostos, šiuo atveju vadinamos ***telūrinėmis***. Telūrinės linijos trukdo tyrinėti dujas, kurių yra ir planetos, ir Žemės atmosferoje. Persiklojančias spektro linijas (juostas) pavyksta atskirti tais momentais, kai planeta Žemės atžvilgiu juda greičiausiai (Doplerio reiškinys). Kitaip esti, kai planetoje daug dujų, kurių Žemė iš viso neturi. Geras pavyzdys – amoniako (NH_3) ir metano (CH_4) juostos didžiųjų planetų spektruose. Aišku, planetų atmosferų cheminę sudėtį tradiciniais metodais geriausia tirti iš DŽP orbitų. Aukštai netrukdo telūrinės linijos, prieinamomis tampa ultravioletinė (čia sugertis daugiausia tolydinė: ją sukelia molekulių disociacija) ir infraraudonoji (čia dauguma dujų turi sugerties juostas) spektro dalys. Molekulinių sugerties juostų yra ir radijo bangų diapazone.

Norint atlikti kiekybinę planetų atmosferų cheminę analizę, reikia matuoti sugerties linijų ir juostų jų spektruose ***tamsį*** (***stiprumą***). Jis priklauso ne tik nuo tam tikrų atomų ar molekulių kiekio atmosferoje, bet dar ir nuo jų kvantinių savybių bei bendro atmosferos tankio. Dėl sugerties linijų (juostų) priklausomybės nuo keleto parametrų sunkiau tyrinėti atmosferų cheminę sudėtį, nors, kita vertus, atsiranda proga įvertinti ne tik tam tikrų dujų kiekį, bet ir bendrą atmosferos slėgį prie planetos paviršiaus.

Aišku, planetų atmosferų cheminės sudėties tyrimas iš Žemės paviršiaus netenka prasmės, kai tuo metu atmosferą ima tiesiogiai tirti tarpplanetiniai erdvėlaiviai.

Planetos spektrą galima panaudoti jos sukimosi apie savo ašį ***periodui*** nustatyti. Periodas paprastai nustatomas sekant planetos paviršiaus detalių padėties kitimą regimajame jos skritulyje. Tačiau jeigu tam tinkamų paviršiaus detalių nematyti, galima pasikliauti dopleriniu atskirų planetos dalių spektro linijų poslinkiu. Juk vienas besisukančio kūno šonas artėja prie stebėtojo, o kitas – tolsta. Praktiškai spektrometro plyšys nukreipiamas palei planetos pusiaują, tada gaunamos pakrypusios spektro linijos: planetos pusiaujo taškų radialinis greitis, artėjant prie jos regimojo krašto, didėja, atitinkamai didėja ir spektro linijos dalių, atitinkančių tuos taškus, poslinkis arba raudonųjų bangų link (tolstančiame šone) arba violetinių bangų link (artėjančiame šone). Pagal pasvirusios linijos galų poslinkį jos centro atžvilgiu nesunku apskaičiuoti planetos pusiaujo taškų linijinį greitį, o tada, jei žinomas dar planetos spindulys, ir jos sukimosi apie ašį periodą. Jeigu periodas surastas iš kitų stebėjimų, tai pagal greitį galima rasti planetos pusiaujinį spindulį.

Ištisiniame planetos spektre matyti du maksimumai. Vienas jų yra regimojoje spektro dalyje ($\sim$0,5 μm) – tai atspindėtos Saulės šviesos spektras, kitas maksimumas yra infraraudonajame spektre ($\sim$4–40 μm) ir atitinka savąjį planetos šiluminį spinduliavimą. Pastarasis kyla dėl paviršinių planetos sluoksnių įšilimo, kurį sukelia sugerta Saulės spinduliuotė ir šilumos srautas iš planetos gelmių. Nusistovėjus pusiausvyrai, planeta išspinduliuoja tiek energijos, kiek jos gauna iš Saulės ir savo centro. Taigi pagal infraraudonąją planetos spektro sritį galima spręsti apie jos ***temperatūrą***. Tyrimams reikia imtuvų, jautrių įvairioms šio spektro dalims, ir filtrų, išskiriančių atskiras dalis. Tyrimams dar pasitelkiami **radioastronomijos** metodai, nes šiluminio spinduliavimo spektras nutįsta ir į radijo bangų diapazoną. Apskritai šios rūšies tyrimai labai pasunkėja todėl, jog Žemės atmosfera blogai praleidžia infraraudonąją spinduliuotę. Be to, interpretuojant stebėjimų duomenis, reikia įskaityti tą Saulės infraraudonosios spinduliuotės dalį, kurią planeta atspindi. Gerai, kad ši dalis yra menka palyginti su pačios planetos spinduliuote.

Ne visada spinduliuotė, atsiradusi planetos paviršiuje, pasiekia stebėtoją. Tai būna tada, kai planetos atmosfera yra neskaidri infraraudoniesiems spinduliams. Šiuo atveju nustatytoji temperatūra yra ne paviršiaus temperatūra, o tinka tam tikram atmosferos sluoksniui, jau paskleidžiančiam į aplinką infraraudonąją spinduliuotę (pvz., Venera). Kai planetos atmosfera gerai praleidžia Saulės šviesą, bet sugeria savąją (infraraudonąją) spinduliuotę, jos paviršiaus temperatūra būna aukštesnė už tą, kurią turėtų nesant dujinio apvalkalo (***šiltnamio reiškinys***).

4.1.3. Radiolokaciniai tyrimai

Radiolokacijos metodas tinka ne tik planetų atstumui nustatyti (žr. 2.7), bet ir jų dydžio, sukimosi apie ašį, paviršiaus reljefo bei fizikinių savybių tyrimui. Radiolokacija ypač reikalinga, kai planetą dengia debesys, nepraleidžiantys optinės spinduliuotės. Į planetą radioteleskopu pasiunčiamas labai trumpas ir labai siauro dažnių intervalo radijo impulsas. Po atspindžio impulsas grįžta pakitusio intensyvumo ir formos. Sugauto impulso intensyvumą lemia atstumas, planetos dydis ir jos radioalbedas. Grįžęs impulsas jau yra ištįsęs laike, nes taikinys yra apvalus, t. y. įvairios jo dalys yra nevienodai nutolusios nuo Žemės. Planetos sukimasis apie ašį sukelia impulso išplitimą pagal dažnius (Doplerio reiškinys). Šis išplitimas, be kita ko, priklauso dar nuo sukimosi ašies orientacijos Žemės atžvilgiu, todėl norint galutinai įvertinti planetos sukimosi periodą ir ašies padėtį erdvėje, reikia atlikti visą seriją planetos stebėjimų. Jeigu planetos paviršiuje yra darinių, nevienodai atspindinčių radijo bangas, jie sukuria papildomas detales grįžusio impulso formoje, ir pagal tai pavyksta nustatyti jų padėtį planetoje.

4.1.4. Kosminiai tyrimai

Nuo 1962 m. planetas, jų palydovus, mažuosius Saulės sistemos kūnus bei tarpplanetinę medžiagą pradėjo tirti **tarpplanetiniai erdvėlaiviai (TE).** Juose įrengiama aparatūra, tinkama įvairiausiems tyrimams atlikti. Tyrimai gali būti vykdomi arba iš TE trajektorijos, praeinančios arti šviesulio, arba paverčiant TE dirbtiniu jo palydovu, arba nuleidžiant aparatūrą į patį šviesulį. Pakeliui į tikslą TE gali dar atlikti naudingą darbą – tirti tarpplanetinės erdvės savybes. Kosminių tyrimų, lyginant juos su antžeminiais stebėjimais, privalumai akivaizdūs dėl mažo atstumo iki kūno ir tiesioginių matavimų galimybės.

Per pirmuosius 4 kosminės eros dešimtmečius daugiausia dėmesio teko Žemės kaimynėms Venerai ir Marsui (aišku, neskaitant Mėnulio). Per tą laiką (iki 2003 m.) Venerai tirti skriejo 25, o Marsui tirti 31 įvairiai pavadintų JAV ir SSRS erdvėlaivių. Tiesa, daugelis skrydžių buvo nesėkmingi. Tolimesnių planetų link TE siuntė tik JAV mokslininkai. Tris kartus šalia Merkurijaus praskriejo vienas TE „Mariner-10". Jupiterio kryptimi lėkė 5 TE, iš jų 3 pasiekė Saturną ir vienas („Vojadžer-2") Uraną bei Neptūną. 5 TE (2 SSRS, 2 Japonijos ir 1 Europos) buvo skirti Halio kometai tirti. Erdvėlaivis „Galilėjus", skriedamas Jupiterio link, perdavė žinių apie du sutiktus asteroidus. Tiktai tokiems kūnams tirti skirtas vienas TE.

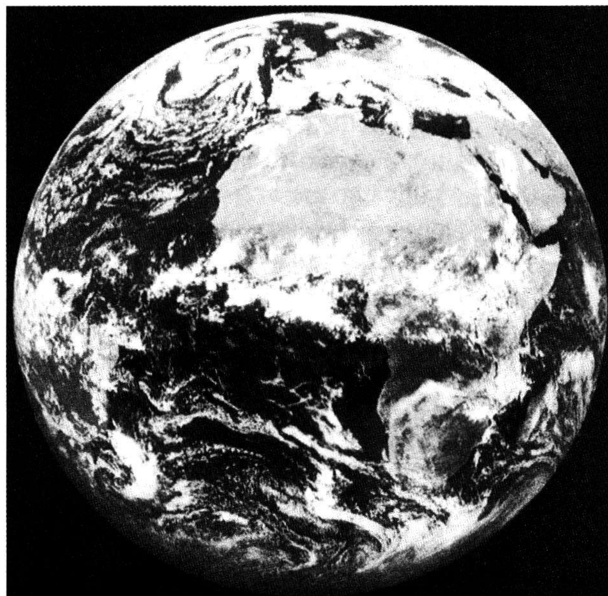
Naudojant TE, sukaupta daug daugiau informacijos apie planetas ir jų palydovus negu per visą teleskopinės astronomijos laikotarpį. Duomenų interpretacijai jau neužtenka vien tik astronomų pastangų, reikalingos geologų, geo-

fizikų, geochemikų ir kt. sričių specialistų žinios. Mokslas apie planetas, naudojant TE, rutuliojasi į daugmaž savarankišką šaką. Tai nereiškia, jog nereikalingi tapo antžeminiai planetų stebėjimai. Būtina nuolat sekti įvairius kitimus planetose, o tai padaryti su TE kol kas dar neįmanoma.

4.2. ŽEMĖ – PLANETA

Žemė, be abejonės, yra geriausiai ištirta planeta, todėl pasakojimą apie šiuos kūnus verta pradėti nuo jos. Suprantama, rašydami apie Žemę, turime paminėti ir kai kurias bendras visoms, ir ypač panašioms į Žemę, planetoms problemas. Čia verta priminti, kad pagal fizikines savybes (žr. priedo 3-ąją lentelę) planetos aiškiai dalijasi į dvi grupes. Artimiausios Saulei planetos – Merkurijus, Venera, Žemė ir Marsas – sudaro vadinamąją ***Žemės grupę***, o Jupiteris, Saturnas, Uranas ir Neptūnas – ***planetų milžinių***, arba ***Jupiterio grupę*** (Plutonas lieka nuošaly).

Žemė (**4.1** pav.) yra didžiausia savo grupėje planeta. Tikrasis jos pavidalas, atsižvelgiant į paviršiaus įvairovę (kalnai, lygumos, jūros ir kt.), yra labai sudėtingas. Tenka ieškoti supaprastintų būdų Žemės formai aprašyti. Todėl buvo įvesta ***geoido*** (gr. *ge* – Žemė + *eidos* – pavidalas) paviršiaus sąvoka. Geoidu vadinamas sunkio jėgų lauko vienodo potencialo paviršius, sutampantis su ramaus vandenyno paviršiumi ir pratęstas per žemynus: geoido paviršius visuose taškuose yra statmenas sunkio jėgos krypčiai. Dėl netolygaus masių



4.1 pav. *Žemė iš kosmoso*

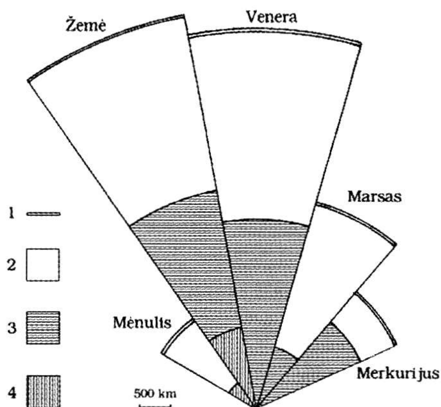
išsidėstymo Žemės viduje geoido forma yra sudėtinga, ir jos neįmanoma tiksliai sutapatinti su kuria nors matematine figūra. Vis dėlto geoidą neblogai atvaizduoja sukimosi elipsoido paviršius, kurio ilgiausias (pusiaujinis) spindulys lygus 6378,140 km, o trumpiausias (ašigalinis) – 6356,755 km. Taigi Žemės ***paplokštumas*** d = 0,0034 (žr. **2,8**). Žemės masė $5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg, vidutinis tankis 5515 kg/m^3.

4.2.1. Vidaus sandara

Apie Žemės vidų daugiausia sužinoma nagrinėjant **seisminių bangų plitimą**. Nustatyta, jog Žemės rutulį sudaro keli nevienodų savybių koncentriniai apvalkalai (**4.2** pav.).

Kraštinis kietas Žemės apvalkalas vadinamas ***pluta***. Žemės pluta yra nevienodo storio. Po vandenynais jos storis 5–10 km, o žemynuose nuo 35 iki 70 km. Kontinentinę plutą sudaro trys sluoksniai: **nuosėdinių uolienų** sluoksnis (iki 15 km), giliau yra vadinamieji **granitinis** ir **bazaltinis** (sustingusios lavos uolienų) sluoksniai. Okeaninėje plutoje granitinio sluoksnio nėra. Žemės plutoje randama visų cheminių elementų. Jie sudaro įvairius junginius, iš kurių ypač išskirtini **silicio** ir **aliuminio oksidai**. Deguonis, silicis ir aliuminis sudaro 84% plutos masės. Vidutinis Žemės plutos tankis 2700 kg/m^3. Jos temperatūra leidžiantis gilyn padidėja 1 K maždaug kas 33 m, nors labai nevienodai įvairiose vietose. Giliai Žemėje temperatūra didėja lėčiau.

Po pluta slūgso kitas Žemės apvalkalas – ***mantija*** (gr. *mantion* – apsiaustas). Jos apatinė riba yra 2900 km gylyje. Žemės mantija dar skirstoma į ***viršutinę*** (iki 950 km gylio) ir ***apatinę***. Viršutinėje mantijoje yra dalinio medžiagos išsilydymo sluoksnis su skystos magmos židiniais. Šio sluoksnio, vadinamo ***astenosfera*** (gr. *asthenes* – silpnas + *sphaira* – rutulys), viršus yra maždaug 100 km gylyje, o apačia – 400 km gylyje. Kitos Žemės mantijos dalys turi kietojo kūno savybes. Mantijos silikatinės* uolienos pagal sudėtį panašios į akmeninius meteoritus (žr. **4.15**). Temperatūra mantijos viršuje 1300 K, o apačioje 3800 K.



4.2 pav. *Žemės grupės planetų ir Mėnulio vidinės sandaros modeliai: 1 – pluta, 2 – mantija, 3 – skystas (?) branduolys, 4 – kietas branduolys*

Mantija supa Žemės ***branduolį***. Pagal medžiagos fazinę būseną branduo-

* Silikatai yra silicio rūgščių druskos. Tai olivinas ($(Mg,Fe)_2[SiO_4]$), piroksenai, žėručiai ir daugybė kitokių aukštos lydimosi temperatūros daugiausia netirpių, labai tvirtų medžiagų.

lys dalijamas į ***išorinį*** ir ***vidinį***. Išorinis 2200 km storio branduolys turi skysčio savybių, nepraleidžia skersinių seisminių bangų. Vidinis 1270 km spindulio branduolys yra kietas. Manoma, kad branduolyje daugiausia yra geležies ir nikelio. Tada geležis taptų labiausiai paplitusiu elementu Žemėje (35% masės), toliau sektų deguonis, silicis, magnis ir kt. Medžiagos tankis, slėgis ir temperatūra didėja nuo Žemės paviršiaus iki pat centro. Čia tankis turėtų būti 12 000–17 000 kg/m^3, slėgis $3{,}6 \cdot 10^{11}$ Pa ir temperatūra 6000–7000 K. Žemės gelmės įkaito tolimoje praeityje (žr. **4.17**), o dabar vidinę jų energiją palaiko **radioaktyviųjų elementų skilimas** bei besitęsianti **gravitacinė diferenciacija**, t. y. didesnio tankio medžiagų grimzdimas ir mažesnio – kilimas.

4.2.2. Paviršius

Planetų ir jų palydovų paviršius formavo tiek vidiniai, tiek išoriniai procesai. Vidinės Žemės jėgos sukūrė kontinentų blokus, okeanų įdubas, kalnų grandines, vulkanus, slėnius ir kitas ne tokias įsidėmėtinas paviršiaus reljefo formas. Kūnuose, kur vidiniai procesai dar tebevyksta, paviršius ir toliau keičiasi. Šiuo atžvilgiu Žemė yra viena aktyviausių planetų.

Teigiama, kad Žemės mantijoje (astenosferoje) dėl nevienodo įšilimo vyksta medžiagos konvekcija. Kylančios ir grimztančios srovės veikia Žemės plutą, ir ji nuolat, nors ir labai lėtai, keičiasi. Tokio tipo kitimus įprasta vadinti ***tektoniniais*** (gr. *tektonikos* – statybinis) reiškiniais. Didelėje jų įvairovėje išsiskiria Žemės plutą sudarančių plokščių slinkimas ir kartu žemynų judėjimas. Pavyzdžiui, Šiaurės Amerika nutolsta nuo Europos 1–2 cm per metus. Plokščių sandūrose iškyla kalnai, pro plyšius veržiasi suslėgta magma, susidaro vulkanai, vyksta dažni žemės drebėjimai.

Mėnulyje ir daugelyje kitų Saulės sistemos kūnų, kurie turi kietus paviršius, matyti daugybė apvalių darinių – ***kraterių***. Dauguma jų atsirado dėl meteorinių kūnų smūgių (žr. **4.15**). Tai jau išorinis veiksnys, ypač didelę įtaką kūnų paviršiaus formavimesi turėjęs tolimoje praeityje. Krateriai išsilaiko milijardus metų, jeigu kūne nėra tektoninio aktyvumo ir paviršiaus darinių erozijos, t. y. kito išorinio faktoriaus. Žemėje randami tik jauni krateriai, o senus užtrynė tektoniniai ir erozijos procesai. Čia, kaip niekur kitur, paviršiaus formas ardo vėjas, krituliai, vanduo, ledynai ir pagaliau biologiniai procesai. Žemės paviršiaus išvaizda neatpažįstamai pasikeisti turėjo maždaug per 500 mln. metų.

Pagal Žemės paviršiaus uolienose esančių radioaktyviųjų elementų izotopų ir jų skilimo produktų kiekio santykį nustatomas laikas, praėjęs nuo uolienų susiformavimo, t. y. paskutiniojo sukietėjimo, momento. Randamų seniausių Žemės uolienų amžius 3,8 milijardų metų. Vadinasi, prieš tai ilgą laiką jos buvo išsilydžiusios (arba kietos ir vėliau išsilydė), nes Žemės, kaip ir visos Saulės sistemos, amžius yra 4,6 milijardų metų (žr. **4.17**).

4.2.3. Hidrosfera

70,8% Žemės paviršiaus dengia vanduo. Vandens apvalkalas (trūkus) vadinamas ***hidrosfera*** (gr. *hydor* – vanduo). Ji susideda iš vandenynų, jūrų, sausumos vidaus ir požeminių vandenų, ledynų ir sniego dangos. Manoma, kad hidrosferoje atsirado gyvybė. Žemė yra vienintelė planeta, kurios paviršiuje yra skysto vandens.

4.2.4. Biosfera

Žemė unikali savo gyvąja gamta. Žemės paviršiaus dalis, kurioje egzistuoja gyvybė, vadinama ***biosfera*** (gr. *bios* – gyvenimas). Tai viršutinis plutos sluoksnis iki 2–3 km gylio, hidrosfera ir atmosfera (laikina organizmų buveinė) – iki 10–15 km aukščio. Nafta, anglys, klintys ir jų dariniai yra gyvosios medžiagos veiklos produktai.

4.2.5. Atmosfera

Prie Žemės paviršiaus ***atmosferos*** (gr. *atmos* – garai) +15 °C temperatūroje tankis 1,22 kg/m^3, molekulių koncentracija $2{,}55 \cdot 10^{25}$ m^{-3}. Visos Žemės atmosferos masė $5{,}15 \cdot 10^{15}$ tonų. Ją sudaro daugiausia azotas ir deguonis. Pagal tūrį azoto yra 78,08%, deguonies – 20,95%, argono – 0,93%, anglies dioksido – 0,03% ir visai mažai neono, helio, metano, vandenilio ir kt. dujų. Patraukia dėmesį labai mažas CO_2 kiekis palyginti su Veneros ir Marso atmosferomis – ten šių dujų yra ~95% tūrio. Žemėje daug CO_2 dujų ištirpo vandenyse ir perėjo į nuosėdines uolienas, daug jų augmenija pavertė į deguonį. Kuo lengvesnės dujos, tuo lėčiau, kylant į viršų, mažėja jų tankis, t. y. kylant į viršų turėtų santykinai gausėti lengvesnių dujų. Tačiau iki 100–120 km aukščio atmosferos cheminė sudėtis vienoda: aktyvi oro turbulencija sumaišo dujas. Aukščiau daugėja deguonies ir azoto atomų, atsiradusių dėl išorinio poveikio disocijuojantis O_2 ir N_2 molekulėms. Nuo 700 km pradeda vyrauti helis, o dar aukščiau – vandenilis.

Žemės atmosferoje visada yra vandens garų, nors jų kiekis ir labai nepastovus (0,1–2,8% tūrio). Garai telkiasi arti Žemės paviršiaus, ir aukščiau 10–15 km tėra jų pėdsakai. Kondensuojantis garams, jie virsta skystais lašeliais ar ledo kristalėliais – susidaro debesys ar rūkas. Be dujų kondensacijos produktų, atmosferoje dar yra pakilusių nuo paviršiaus ir atlėkusių iš kosminės erdvės kietų dulkelių. Kietų ir skystų dalelių, arba ***aerozolių*** (gr. *aer* – oras + vok. *Sole* – tirpalas) kiekis Žemės atmosferoje didėja dėl žmonijos veiklos.

Pagal temperatūros vertikalųjį pasiskirstymą Žemės atmosfera dalijama į keletą sluoksnių. Apatinis sluoksnis vadinamas ***troposfera*** (gr. *tropos* – posūkis). Jos storis 12–18 km (priklauso nuo platumos), vidutinė temperatūra viršuje lygi 218 K. Troposferoje sukaupta 80% visos atmosferos masės ir beveik visi vandens garai. 8 km aukštyje slėgis sumažėjęs e kartų. Virš troposferos yra

stratosfera (lot. *stratum* – sluoksnis). Joje, 20–30 km aukštyje, yra didžiausia atmosferos **ozono** (O_3) koncentracija. Ozono sluoksnis sugeria ultravioletinius (200–300 nm) Saulės spindulius, ir todėl stratosferos oras įšyla. Stratosferos viršuje, t. y. 50–55 km aukštyje, temperatūra padidėja iki 273 K. Toliau temperatūra vėl krinta ir 80–85 km aukštyje pasiekia absoliutų minimumą – 190 K. Tai ***mezosferos*** (gr. *mesos* – tarpinis, vidurinis) viršutinė riba. Mezosferą gaubia ***termosfera*** (gr. *thermos* – karštas), kurioje temperatūra, kylant į viršų, didėja. Tai tęsiasi maždaug iki 400 km, kol temperatūra pakyla vidutiniškai iki 1500 K ir toliau laikosi daugmaž stabili. Fizines sąlygas čia lemia trumpabangė bei korpuskulinė Saulės spinduliuotė ir kosminiai spinduliai. Šie išoriniai veiksniai ardo molekules, jonizuoja jas ir atsiradusius atomus. Dėl padidėjusios jonų koncentracijos viršutinė mezosferos dalis ir termosfera dažnai vadinamos ***jonosfera***. Laikoma, kad 800 km aukštyje baigiasi termosfera ir prasideda paskutinysis palaipsniui pereinąs į tarpplanetinę erdvę sluoksnis – ***egzosfera*** (gr. *exo* – išorėje). Atominio vandenilio pėdsakų dar yra iki 100 tūkstančių km nuo paviršiaus – tai Žemės ***vainikas***.

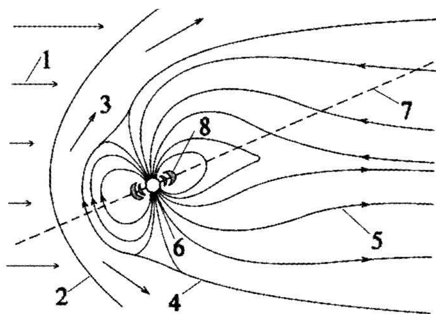
Dėl aukštos viršutinės atmosferos temperatūros dalis lengvų vandenilio ir helio atomų įgyja greitį, didesnį negu antrasis kosminis ir apleidžia Žemę. Toks procesas vadinamas atmosferos ***disipacija*** (lot. *dissipatio* – sklaida). Sunkesnes dujas Žemė pajėgia išlaikyti prie savęs.

Atmosfera turi lemiamos įtakos Žemės klimatui. Oro cirkuliacija sumažina temperatūros skirtumą tarp nevienodai įšylančių nuo Saulės spinduliuotės Žemės rutulio vietų. Atmosferos šiluminė talpa mažina temperatūros svyravimą per parą. Vandens garų ir anglies dioksido molekulės, sugerdamos infraraudonąją spinduliuotę, sukuria **šiltnamio reiškinį**, kuris vidutinę Žemės paviršiaus temperatūrą pakelia beveik 35 K (iki 288 K). Pramoninė žmonijos veikla didina anglies dioksido kiekį atmosferoje. Tai gali sukelti nepageidaujamus klimato pasikeitimus. Užteršus atmosferą anglies, fluoro ir chloro junginiais (freonais), plonėja ozono sluoksnis, kuris saugo Žemės gyvybę nuo pražūtingų Saulės ultravioletinių spindulių.

4.2.6. Magnetosfera

Žemė turi gana stiprų **magnetinį lauką**, panašų į **magnetinio dipolio** lauką. Jo ašis su Žemės sukimosi ašimi dabar sudaro 11°,5 kampą ir praeina 450 km šalia Žemės centro. Ties ***geomagnetiniais poliais*** Žemės magnetinio lauko **indukcija** lygi $6{,}2 \cdot 10^{-5}$ teslos (magnetinio lauko stipris 48 A/m), ties ***geomagnetiniu pusiauju*** – dvigubai mažesnė. Didesniu atstumu Žemės magnetinį lauką visiškai deformuoja Saulės vėjas su „įšaldytu“ jame magnetiniu lauku (žr. **5.32**). Saulės vėjas apriboja planetos magnetinį lauką tam tikroje erdvėje. Ši erdvė ir vadinama ***magnetosfera***.

Maždaug 90 000 km nuo Žemės magnetinis laukas staiga stabdo Saulės vėją,



4.3 pav. *Žemės magnetosferos pjūvis magnetinio dienovidinio plokštuma: 1 – Saulės vėjas, 2 – smūginės bangos frontas, 3 – pereinamasis sluoksnis, 4 – magnetopauzė, 5 – magnetinio lauko jėgų linijos, 6 – Žemė, 7 – geomagnetinio pusiaujo plokštuma, 8 – radiacijos juostos*

susidaro ***stovinti smūginė banga*** (**4.3** pav.). Už smūginės bangos fronto Žemės kryptimi tvarkingas elektringųjų dalelių judėjimas sutrinka, padidėja dalelių koncentracija, sustiprėja ir susipina jų nešamas magnetinis laukas, plazmos temperatūra padidėja iki milijonų laipsnių. Ši plazma užpildo vadinamąjį ***pereinamąjį sluoksnį***, t. y. maždaug 20 000 km storio tarpą tarp smūginės bangos fronto ir magnetosferos ribos – ***magnetopauzės***. Pastaroji dieninėje Žemės pusėje praeina maždaug už 70 000 km nuo Žemės. Saulės vėjas iš Saulės pusės suspaudžia magnetinio lauko linijas, o priešingoje pusėje jas ištempia ir sudaro daugiau kaip 5 mln. km ilgio ***magnetosferos uodegą***, arba ***šleifą***. Prie magnetopauzės Saulės vėjo slėgis lygus magnetinio lauko slėgiui, ir dauguma Saulės vėjo dalelių nepajėgia prasiskverbti pro ją. Tokioms dalelėms belieka apeiti magnetosferą iš šonų.

Žemę palei geomagnetinį pusiaują juosia labai didelės energijos protonų ir elektronų žiedas, vadinamas ***radiacijos juosta***. Čia elektringosios dalelės yra įstrigusios magnetiniame lauke, juda spiralinėmis trajektorijomis aplink jo jėgų linijas. Geomagnetinio poliaus srityje, kur jėgų linijos sutankėjusios, spiralės spindulys bei žingsnis mažėja, dalelė pradeda suktis beveik vietoje, pagaliau atsispindi ir vėl spirale lekia prie kito poliaus, o iš ten vėl atgal ir t. t. Įvairiose radiacijos juostos dalyse dalelių koncentracija ir energija nėra vienodos, todėl dažnai kalbama ne apie vieną juostą, o apie kelias. Išskiriamos dvi pagrindinės radiacijos juostos – ***vidinė*** ir ***išorinė***. ***Vidinė*** radiacijos juosta yra tarp ±30° geomagnetinių platumų 2400–5600 km aukštyje: joje daugiausia susitelkę 20–100 MeV energijos protonai ir 20–500 keV energijos elektronai. Mažesnės energijos protonai ir elektronai sudaro ***išorinę*** radiacijos juostą, kuri yra 12 000–25 000 km aukštyje. Arčiausiai Žemės (200–300 km) ši juosta prieina 50°–60° platumose. Dar aukštesnes platumas pasiekia radiacijos juosta, sudaryta daugiausia iš elektronų, kurių energija mažesnė kaip 200 keV, ir esanti virš geomagnetinio pusiaujo 50 000–60 000 km atstumu. Ši, ***trečioji***, radiacijos juosta nevadinama išorine, nors beveik pasiekia dieninės pusės magnetosferos ribą.

Saulės vėjo dalelės sunkiai patenka į magnetosferos vidų, tačiau taip gali atsitikti didelio Saulės aktyvumo laikotarpiais, kai Saulės vėjas darosi ypač nepastovus ir itin stiprus. Saulės vėjo „gūsiai“ keičia magnetosferos formą ir mag-

netinio lauko struktūrą, magnetopauzėje atsiranda „plyšių“. Dalelės, prasiskverbusios į magnetosferą, papuola į greitai kintančių magnetinių laukų indukuotus elektrinius laukus, yra jų greitinamos ir papildo radiacijos juostas.

Magnetosferą labiausiai trikdo dalelių srautai, išmesti Saulės ***chromosferinio žybsnio***. Tokie srautai, užplūdę Žemę, sukelia vadinamąsias ***magnetines audras***, deformuoja radiacijos juostas, ypač išorinę. Tuo pat metu magnetinio lauko nukreiptos greitos dalelės aukštai atmosferoje ties geomagnetiniais poliais sukelia papildomą jonizaciją ir jonosferos švytėjimą (***poliarinę pašvaistę***) bei trumpabangio radijo ryšio trikdžius.

Žemės magnetizmo kilmė siejama su elektros srovėmis skystame elektrai laidžiame išoriniame branduolyje. Dėl temperatūros nevienodumo šiame sluoksnyje atsiranda ***konvekcinės srovės***, kurias dar ištempia branduolio sukimasis nevienodu kampiniu greičiu. Tokios elektrai laidžios srovės yra tarsi judantys laidininkai. Tada, esant kažkokiam, nors ir silpnam, magnetiniam laukui, jose atsiranda elektros srovė. Ji sužadina magnetinį lauką, kuris sustiprina pradinį magnetinį lauką, o šis savo ruožtu sustiprina elektros srovę ir t. t. (dinamo mašinos su savuoju žadinimu principas). Nusistovėjus procesams, susikuria pastovus Žemės magnetinis laukas. Tačiau tai tėra tik bendros idėjos, o detalios geomagnetizmo teorijos dar nėra. Taip pat neaišku, kodėl keičiasi Žemės magnetinio lauko kryptis. Per paskutiniuosius 3,5 mln. metų Žemės magnetinio lauko poliai pasikeite vietomis 9 kartus. Magnetinio lauko kryptis užsikonservuoja stingstančioje turinčioje geležies lavoje, kuri veržiasi iš gelmių Žemės plutos plokščių atsiskyrimo vietose. Jaunoje plutoje tarsi magnetinėje juostoje užrašyta Žemės magnetinio lauko istorija.

4.3. MĖNULIS

Mėnulis – vienintelis natūralus Žemės palydovas ir kol kas vienintelis dangaus kūnas, kurį aplankė žmogus (**4.4** pav.). Mėnulyje pabuvojo 12 JAV astronautų. Pirmieji ant Mėnulio paviršiaus nužengė Nylas Armstrongas (*N. Armstrong*) ir Edvinas Oldrinas (*E. Aldrin*). Tai įvyko 1969 m. liepos 21 d. Iš viso Mėnuliui tirti buvo nusiųsta per 60 JAV, SSRS ir Japonijos (2) erdvėlaivių. Vieni jų skriejo pro šalį, kiti tapo dirbtiniais Mėnulio palydovais, dar kiti nusileido ant jo paviršiaus. Į Žemę atgabenta 382 kg Mėnulio dirvos pavyzdžių.

Mėnulis skrieja aplink Žemę gana ekscentriška orbita, o jo vidutinis nuotolis lygus 384 400 km (detaliau žr. **2.20**). Mėnulio trauka Žemėje sukelia potvynius, kurie dėl trinties mažina Žemės sukimosi apie ašį greitį (žr. **2.17**). Savo ruožtu potvynio bangos, esančios Žemės šone, atsuktame į Mėnulį, trauka greitina Mėnulį, ir dėl to jo orbita didėja. Dabar kasmet Mėnulio orbitos apogėjaus nuotolis padidėja 3,8 cm.

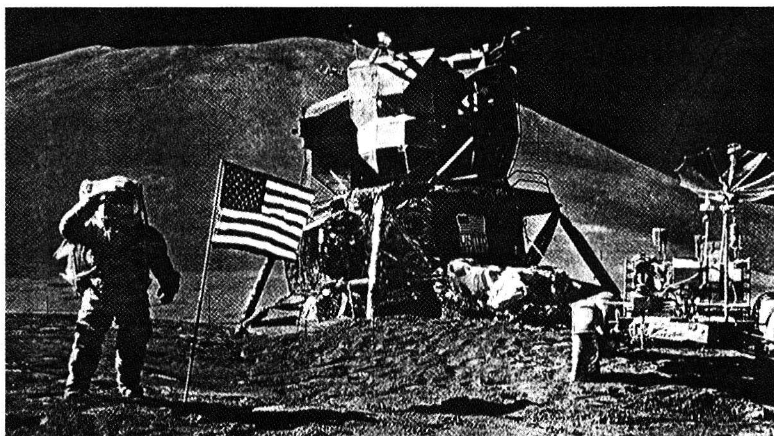
Dabar Mėnulis apskrieja Žemę per 27,3 paras (žvaigždinis mėnuo). Per lygiai tokį pat laiką jis apsisuka apie savo ašį (toks periodų sutapimas vadinamas

sinchroniniu sukimusi). Todėl iš Žemės matoma visada ta pati Mėnulio pusė. Para Mėnulyje lygi sinodiniam mėnesiui, t. y. trunka 29,5 mūsiškes paras.

Mėnulis labai mažai skiriasi nuo taisyklingo 1738 km spindulio rutulio (1/4 Žemės spindulio). Jo masė 81,3 karto mažesnė už Žemės masę, vidutinis tankis lygus 3340 kg/m^3. Laisvojo kritimo pagreitis Mėnulyje 1,6 m/s^2, antrasis kosminis greitis – 2,4 km/s.

Mėnulio paviršiaus reljefas labai savitas, visiškai nepanašus į Žemės paviršiaus reljefą. Jau plika akimi Mėnulio skritulyje galima išskirti tamsesnes ir šviesesnes dėmes. Tamsios sritys nuo seno vadinamos ***jūromis***. Tai gana lygios bemaž apskritos Mėnulio **žemumos**. Jūrų skersmuo būna nuo 200 iki 1200 km, o didžiausia žemuma – **Audrų vandenynas** – didesnė kaip 2000 km. Jūros apima apie 40% matomos Mėnulio pusės ploto. Kitą dalį sudaro šviesesnės kalnuotos sritys – vadinamieji ***žemynai***. Juose plyti šimtų km ilgio ir 3–6 km aukščio kalnagūbriai, atskiri kalnai, plokščiakalniai su stačiais šlaitais, matyti ilgi (iki 100 km) šimtų metrų pločio ir gylio plyšiai plutoje, dešimčių km pločio slėniai. Kalnagūbriai daugiausia išsidėstę palei jūrų pakraščius. Didžiausias kalnas Mėnulyje siekia 9 km. Neregimoji Mėnulio pusė gerokai skiriasi nuo regimosios. Ten daug mažiau jūrų (apie 3%), o ir tos mažesnės, nėra įsimenančių kalnų grandinių. Pasitaiko didelių darinių, panašių į jūras, tačiau ne tamsių, bet šviesių. Tokios žemumos pavadintos ***talasoidais*** (gr. *thalassoeides* – panašus į jūrą).

Be abejo, būdingiausia Mėnulio reljefo forma – žiediniai kalnai, arba ***krateriai*** (**4.5** pav.). Didesnius kraterius sudaro žiedinis pylimas (iki 5 km aukščio) su stačiais vidiniais šlaitais ir plokščias dugnas su kalnu centre. Dugnas paprastai būna žemiau aplinkinio lygio. Kai kurie didieji krateriai neturi centrinės aukštumos, tada jie vadinami ***cirkais***. Didžiausių Mėnulio kraterių skersmuo siekia 250 km. Kraterių, kurių skersmuo didesnis kaip 20 km, vien



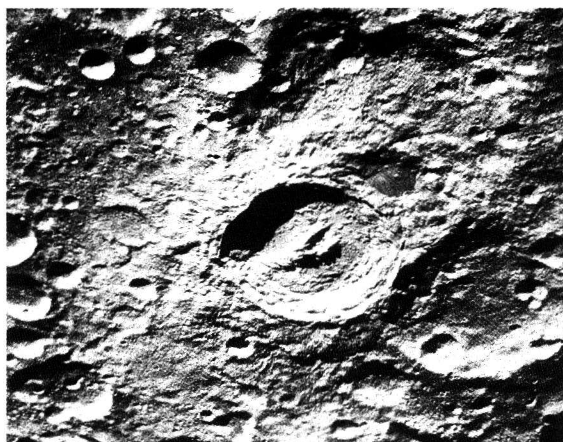
4.4 pav. *Žmogus Mėnulyje*

regimojoje Mėnulio pusėje yra keletas šimtų. Apskritai kuo mažesnis krateris, tuo jų daugiau. Mažų krateriukų yra nesuskaičiuojama daugybė, jie dengia visą Mėnulio paviršių (ir didesnius kraterius). Kai kurie didesni ir visi smulkūs krateriai yra piltuvo formos, kaip sprogimo duobė. Dauguma kraterių yra žemynuose, tačiau nemažai pasitaiko ir jūrose, ypač mažesnių. Nuo kai kurių kraterių eina šviesūs spinduliai, kurie baigiasi už šimtų ar net tūkstančių kilometrų. Išaiškinta, kad spindulių įspūdį teikia ne išsklaidyta šviesesnė medžiaga, bet maži krateriai, geriau atspindintys Saulės šviesą. Matyt, tai yra antriniai krateriai, išmušti skeveldrų, išlėkusių iš tos vietos, kur atsirado stambus pirminis krateris.

Didesni Mėnulio krateriai pavadinti žymių žmonių vardais, kalnagūbriai – Žemės kalnų grandinių pavadinimais, jūros – šiaip įvairiais vardais (pvz., Lietų, Ramybės, Nektaro jūros). *Trys krateriai pavadinti Vilniaus astronomų Počobuto, Sniadeckio ir Dzevulskio vardais.*

Viršutinį Mėnulio paviršiaus sluoksnį sudaro akyta ir iš dalies lipi susmulkinta medžiaga – ***regolitas*** (gr. *rhegos* – danga + *lithos* – akmuo). Tai įvairiausio dydžio uolienų nuolaužos, apsilydę medžiagos gabalėliai, dulkės, atsiradusios dėl meteorinių kūnų smūgių bei didelio temperatūros svyravimo. Plonas dulkių sluoksnis dengia Mėnulyje viską. Meteoritinės medžiagos regolite randama apie 1%. Mėnulio regolito storis nuo 5 iki 15 m.

Mėnulio paviršius labai blogai atspindi Saulės šviesą – vidutinis vizualinis sferinis albedas yra tiktai 0,07. Tamsiausios vietos – jūros – sudarytos iš **bazaltų** (magnio ir geležies silikatų), o geriau atspindintys šviesą žemynai – iš **anortozitų** (aliuminio ir kalcio silikatų). Tamsios uolienos yra didesnio tankio negu šviesios. Visos uolienos formavosi vėstant ir kietėjant lavai, tačiau pagal jų vidinę struktūrą galima spręsti, kad sparčiau vėso jūrų uolienos. Trečia uolienų rūšis, randama paviršiuje, yra ***brekčijos*** – meteorinių kūnų smūgio



4.5 pav. *Mėnulio paviršius*

metu susicementavusios mažos įvairaus tipo uolienų ir mineralų nuolaužos. Mėnulio uolienų amžius, nustatytas pagal radioaktyviųjų elementų ir jų irimo produktų kiekį (t. y. laikas nuo paskutiniojo išsilydžiusios uolienos sutankėjimo), yra nevienodas. Aukštumų anortozitų amžius yra apie 4 milijardai metų, tačiau pasitaiko uolienų (regolito fragmentų), kurių amžius siekia net 4,5 milijardo metų. Ne itin senesnis ir visas Mėnulis. Bazaltinės žemumos kristalizavosi prieš 3,2 milijardo metų. Mėnulio uolienose daugiau titano, urano, geležies ir magnio, bet mažiau kalio, natrio, vario, argono ir chloro negu Žemės uolienose. Be to, jos visiškai sausos.

Mėnulis dėl mažos savo masės nepajėgia išlaikyti atmosferos. Trumpam pagautos Saulės vėjo dalelės tesudaro dujų apvalkalo pėdsakus. Nėra atmosferos – nėra kam palaikyti šilumos. Ten, kur Saulė yra zenite, Mėnulio paviršius įkaista iki 400 K, o ten, kur ilga naktis, atvėsta iki 110 K. Labai greitas paviršiaus atvėsimas (įkaitimas) fiksuojamas per Mėnulio užtemimus, kai per valandą su trupučiu jo temperatūra sumažėja (padidėja) maždaug 200 K. Visa tai rodo, jog Mėnulio regolitas labai nelaidus šilumai. Šiluminės radijo bangos ateina iš gilesnių paviršiaus sluoksnių, ir pagal tai matyti, kad jau 1 m gylyje temperatūra ir dieną, ir naktį lieka beveik ta pati.

Ties Mėnulio ašigaliais (jo sukimosi ašis beveik statmena orbitos plokštumai) Saulės spinduliai niekada nepasiekia kraterių dugno. Amžino šešėlio vietose temperatūra tesiekia maždaug 100 K. Galima įtarti, jog ten gali būti susikaupusio vandens ledo. Tyrimai, atlikti specialia metodika iš dirbtinių Mėnulio palydovų, praskriejančių virš ašigalių, parodė, jog iš tiesų labai tikėtinas **amžinojo įšalo** egzistavimas tų kraterių dugne. Per abu ašigalius jis turėtų aprėpti apie dešimtį tūkstančių km^2. Susimaišiusio su regolitu ledo storis, kaip manoma, yra 0,5–2 m. Ledai gali susidaryti nusėdus vandens garams, kurios paskleidžia nukritę kometų branduoliai ir meteoriniai kūnai.

Mėnulyje įrengti labai jautrūs seismografai registruoja silpnus jo drebėjimus. Dalį drebėjimų sukelia meteorinių kūnų smūgiai ir (labai silpnus) greitas paviršiaus uolienų plėtimasis ir traukimasis, sukeltas didelio temperatūros kitimo. Kitų drebėjimų židiniai slypi Mėnulio gelmėse. Pagal seisminių bangų plitimą ir pagal dirbtinių Mėnulio palydovų judėjimą sprendžiama apie Mėnulio vidaus sandarą. Po regolito sluoksniu slūgso 60 km storio bazaltų **pluta**. Po to eina stora ir galbūt kieta silikatų **mantija**. Maždaug 340 km nuo centro prasideda skystas ar pusiau skystas 1500 K temperatūros metalinis **branduolys**. Gal dėl branduolio mažumo Mėnulis praktiškai neturi bendro magnetinio lauko. Tačiau tolimoje praeityje jis galėjo būti, nes kai kurių vietų uolienose (su didesniu geležies kiekiu) yra liktinio magnetizmo. Po daugeliu Mėnulio jūrų aptikti masyvūs medžiagos sutankėjimai – **maskonai** [angl. *mascon < mas(s) con(centration)*].

Vėstantį Mėnulio paviršių formavo tiek vidinės, tiek išorinės (meteorinių kūnų smūgiai) jėgos. Dauguma (jei ne visi!) kraterių yra smūgių padariniai.

Daugelis jų atsirado maždaug prieš 4 milijardus metų, t. y. tada, kai Saulės sistemoje dar buvo gausu stambių meteorinių kūnų. Mėnulio jūrose kraterių mažiau, ir tai rodo, kad jos susidarė vėliau. Jūros atsirado tada, kai iš radioaktyviųjų elementų skilimo įkaitintų Mėnulio gelmių prasiveržė lava ir užtvindė paviršiaus įdubas. Galima manyti, kad kai kur lavos išsiliejimą skatino galingi didelių (dešimčių km skersmens) kūnų smūgiai. Per paskutiniuosius 3 milijardus metų Mėnulio veidas mažai keitėsi – aprimo vidiniai procesai, mažiau liko didesnių meteorinių kūnų. Tebekrintą smulkūs meteoriniai kūneliai (ir retkarčiais didesni) tik smulkino ir maišė jau sutrupintą medžiagą, t. y. kėlė pokyčius, daugiausia juntamus tik regolito lygyje.

Mėnulis susidarė prieš 4,6 milijardo metų. Tačiau kaip visa tai vyko – dar mįslė. Iš keleto pasiūlytų hipotezių didžiausio dėmesio sulaukė dvi. Pagal vieną jų Mėnulis formavosi kartu su Žeme iš to paties pirminio medžiagos ūko (žr. **4.17**). Pagal šią prielaidą sunkiausia paaiškinti Mėnulio ir Žemės cheminės sudėties skirtumus. Kodėl, pavyzdžiui, kitokia Mėnulio mineralų sudėtis? Arba kodėl Mėnulio geležiniame branduolyje sukaupta vos 4% visos masės, kai Žemės branduolyje net 30%? Kita, beje, vis labiau populiarėjanti hipotezė teigia, jog į ką tik susidariusią Žemę 10 km/s greičiu trenkė irgi tik susiformavęs, maždaug du kartus mažesnis kūnas. Galingas smūgis išblaškė dalį Žemės mantijos ir didesnę dalį kritusio kūno mantijos, o metaliniai branduoliai apsijungė ir sudarė Žemės branduolį. Išmesta silikatinių mantijų medžiaga (su maža metalų priemaiša) sudarė aplink Žemę žiedą, o šis pamažu susikoncentravo į Mėnulį. Po susidarymo Mėnulis buvo daug arčiau Žemės negu dabar. Priėmus šią hipotezę, irgi sunku paaiškinti kai kurias iškylančias rimtas problemas.

Kai kurie duomenys apie Mėnulį ir kitus didesnius planetų palydovus pateikti priedo **4**-oje lentelėje.

4.4. MERKURIJUS

Merkurijus – artimiausia Saulei planeta. Jis aplink Saulę skrieja didelio ekscentriciteto orbita: planetos nuotolis nuo Saulės kinta nuo 46 mln. km perihelyje iki 70 mln. km afelyje. Merkurijus Saulę apskrieja per 88 žemiškas paras, o apie savo ašį, beveik statmeną orbitos plokštumai, apsisuka per 59 paras. Toks periodų derinys rodo, jog saulinė para Merkurijuje trunka 176 žemiškas paras.

Iš Žemės Merkurijų sunku stebėti, nes jis danguje visada yra arti Saulės, ne toliau 28°. Didžioji dalis duomenų apie šią planetą buvo sukaupta tik 1974–1975 m., kai pro ją tris kartus praskriejo JAV erdvėlaivis „Mariner-10“. Be viso kito, pagal Merkurijaus traukos poveikį erdvėlaivio judėjimui buvo dar patikslinta jo masė.

Merkurijus – maža planeta: jo spindulys 2440 km, t. y. 2,6 karto mažesnis

už Žemės spindulį ir vos 1,4 karto didesnis už Mėnulio spindulį. Merkurijaus masė 18 kartų mažesnė už Žemės, tačiau jo vidutinis tankis yra didelis ir artimas Žemės tankiui, būtent 5430 kg/m^3. Planetos modelis, paremtas šiais skaičiais ir palyginimu su Žemės sandara, rodo, kad Merkurijaus vidų turėtų sudaryti didelis, maždaug 1600 km spindulio geležies ir nikelio lydinio **branduolys** ir virš jo esanti palyginti plona silikatų **mantija**.

Merkurijaus paviršius išmargintas daugybe apskritų įvairaus dydžio smūginių kraterių (**4.6** pav.). Yra kraterių, kurių skersmuo siekia 200 km. Nuo kai kurių stambių kraterių spinduliais eina mažų (matyt, antrinių) kraterių grandinės. Paviršiuje matyti daugiau negu 20 didelių ***įdubų*** – negilių žemumų, kažkada išmuštų stambių meteorinių kūnų ar asteroidų ir užlietų prasiveržusios lavos. Įdubos taip pat nusėtos vėlesnio laikotarpio smūginių kraterių, jas juosia iki 2 km aukščio kalnų žiedai. Didžiausios įdubos, vadinamos ***Kaitros jūra***, skersmuo net 1300 km. Merkurijaus reljefui savitumo teikia nuo 20 iki 500 km ilgio ir iki 3 km aukščio statūs skardžiai. Tai, matyt, planetos paviršiaus raukšlės, atsiradusios planetai vėstant ir traukiantis. Apskritai Merkurijaus paviršius panašus į Mėnulio, tačiau yra ir skirtumų, kaip antai: Mėnulyje nėra ilgų skardžių, o Merkurijoje krateriai retesni ir palyginti mažiau mažų kraterių. Vadinasi, bombarduojančių kūnų dydžių pasiskirstymas ties Merkurijum buvo kitoks negu Mėnulio aplinkoje.

Kai Merkurijus yra perihelyje, jo paviršius ties pusiauju vidurdienį įkaista iki 700 K, o vidurnaktį temperatūra krinta iki 100 K. Tai didžiausia parinė temperatūros kaita, kokia yra žinoma Saulės sistemoje. Taip negalėtų būti, jei



4.6 pav. *Merkurijus*

planeta turėtų šilumą sulaikančią atmosferą. Merkurijus jos neturi, nes per ilgą dieną dujos įkaista taip, kad net sunkiausios molekulės įgyja greičius, didesnius už pabėgimo (antrąjį kosminį) greitį, kuris šioje planetoje yra mažas (4,3 km/s). Tiesa, griežtai vertinant, Merkurijuje labai reta ir nuolat atsinaujinanti atmosfera yra. Čia aptinkama vandenilio ir helio dujų, galbūt pagrobtų iš Saulės vėjo, bei natrio ir kalio garų, išlaisvintų iš uolienų veikiant Saulės ultravioletiniams spinduliams.

Pagal šiluminį radijo spinduliavimą centimetriniame diapozone nustatyta, kad jau kelių decimetrų gylyje ir dieną, ir naktį Merkurijaus temperatūra beveik ta pati. Taigi jo paviršinis sluoksnis yra labai blogas šilumos laidininkas. Kaip ir Mėnulyje, jį greičiausiai sudaro smulki sutrupintų uolienų medžiaga. Merkurijaus paviršius atspindi vos 7% Saulės šviesos.

Aptiktas dipolinis Merkurijaus **magnetinis laukas**. Jis yra maždaug 200 kartų silpnesnis negu Žemės. Dipolio ašis su planetos sukimosi ašimi sudaro 12° kampą. Labai neaiški šio lauko kilmė. Kaip matėme (žr. **4.2.6.**), Žemės magnetinis laukas siejamas su karštu, skystu metaliniu branduoliu ir palyginti greitu sukimusi apie ašį. Merkurijuje metalinis branduolys yra, bet, reikia manyti, jis šaltas ir kietas (maži kūnai greitai vėsta), be to, Merkurijus sukasi labai lėtai. Panašu, jog reikia ieškoti kitokio šios planetos magnetinio lauko atsiradimo šaltinio. O galbūt Merkurijaus branduolys (ar jo dalis) yra dar skystas? Nors ir Merkurijaus magnetinis laukas silpnas, tačiau jis atlaiko tankaus Saulės vėjo spaudimą ir formuoja aplink planetą mažą magnetosferą.

Merkurijus palydovų neturi. Tai vienišas, senas, sustingęs pasaulis. Nepaveiktas intensyvių vidinių procesų ir atmosferinės erozijos paviršius išliko maždaug toks koks buvo prieš 4 milijardus metų, kai neseniai susiformavusią karštą planetą daužė meteoriniai kūnai palikdami kraterių ir įdubų pavidalo pėdsakus.

4.5. VENERA

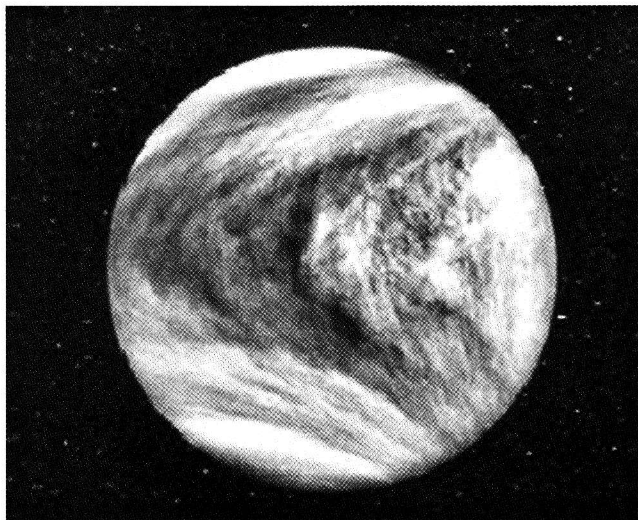
Žemės kaimynės Veneros vidutinis nuotolis nuo Saulės 108 mln. km. Iš visų planetų Veneros orbita mažiausiai skiriasi nuo apskritiminės, todėl jos nuotolis nuo Saulės kinta labai mažai ir visada yra artimas minėtai vidutinei reikšmei. Saulę Venera apskrieja per 225 Žemės paras. Dangaus skliaute Venera nuo Saulės nebūna toliau negu 48°, todėl ji matoma arba vakarais (tada dažnai ji vadinama Vakarine žvaigžde) arba rytais (Aušrinė žvaigždė). Už Venerą stipriau spindi tik Saulė ir Mėnulis, ją galima įžiūrėti ir dieną. Ji tokia šviesi todėl, kad labai gerai atspindi Saulės spindulius.

Pro teleskopą Veneroje praktiškai nieko nematyti, nebent labai neaiškios ūkanotos dėmės. Išraiškingiau planeta atrodo nuotraukose, gautose ultravioletiniuose spinduliuose (**4.7** pav.). Jose regėti daug beformių dėmių dėmelių, kai kur pasirodo bemaž lygiagrečios juostos. Toks vaizdas diena iš dienos keičiasi, ir nėra abejonės, jog mes matome ne patį planetos paviršių, bet debesis jos

atmosferoje. Debesų sluoksnis turi būti storas, nes niekados nesusidaro properšų, pro kurias pasimatytų bent gabalėlis paviršiaus. Debesų šydą gali įveikti tik radijo bangos, todėl radiolokacija tapo vienu svarbiausiu Veneros tyrimo metodu. Kita vertus, tirti tai, kas yra žemiau debesų gaubto, padeda nuleidžiamieji erdvėlaiviai.

Jau antžeminės radiolokacijos būdu buvo gauta daug duomenų apie Veneros paviršių ir jos sukimąsi. Kieto Veneros paviršiaus spindulys lygus 6052 km; o jos sukimosi ašis beveik statmena orbitos plokštumai. Apie savo ašį Venera sukasi labai lėtai: kartą apsisuka per 243 mūsiškas paras. Dar viena keistenybė – Venera sukasi priešinga kryptimi negu dauguma planetų, t. y. **iš rytų į vakarus**. Sukimosi apie ašį ir skriejimo aplink Saulę periodų derinyje išeina, jog para Veneroje lygi 117 Žemės parų.

Venera gamtinių palydovų neturi. Jos masė buvo tiksliai nustatyta (pagal trečiąjį Keplerio dėsnį) tik po to, kai aplink ją pradėjo skrieti dirbtiniai palydovai. Pagal masę (0,82 Žemės masės), skersminį (12104 km) ir vidutinį tankį (5250 kg/m^3) Venera labai panaši į Žemę. Taigi reikia manyti, kad ir šių planetų gelmės yra panašios. Kadangi Veneros vidutinis tankis šiek tiek mažesnis už Žemės, tai jos skystas metalinis **branduolys** turi būti mažesnis, o silikatų **mantija** storesnė. Mantiją gaubia uolienų **pluta**. Pritaikius Žemės magnetinio lauko kilmės teoriją Venerai, atrodytų, jog ji galėtų turėti magnetinį lauką, tik dėl labai lėto planetos sukimosi daug silpnesnį. Deja, jo neaptikta. Ir vėl problema! Merkurijaus atveju sunku suprasti magnetinio lauko buvimą, o Veneros atveju – atvirkščiai – nebuvimą. Galbūt Žemės modelis netinka visoms planetoms? Galima dar daryti prielaidą, kad Venera dabar yra

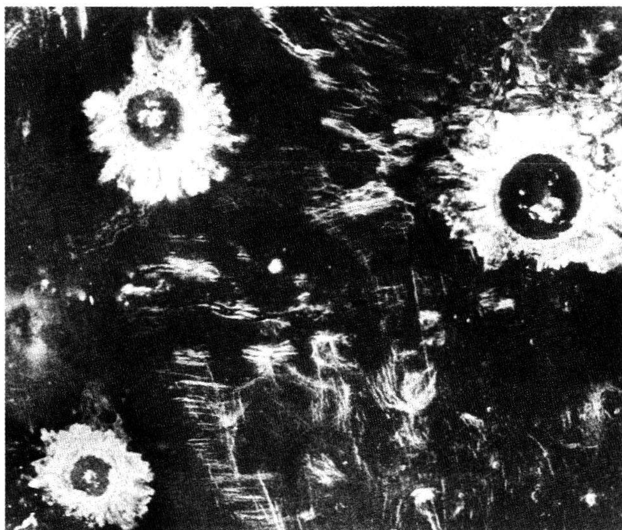


4.7 pav. *Venera ultravioletiniuose spinduliuose*

magnetinio lauko polių kaitos laikotarpio viduryje, o tada laukas bus smarkiai susilpnėjęs.

Pagal radiolokatorių, įrengtų dirbtiniuose Veneros palydovuose (ypač erdvėlaivyje „Magelanas“), duomenis sudaryti gana detalūs Veneros paviršiaus reljefo žemėlapiai, juose jau matyti 100–200 m dydžio dariniai (**4.8** pav.). Apskritai Veneros paviršius yra gana plokščias. Didžiąją jo dalį sudaro kalvotos lygumos. Jose matyti tūkstančiai vulkaninių kupolų ir vulkanų kūgių, pasižyminčių labai nuolaidžiais šlaitais. Dažnai vulkano viršūnėje žiojėja apiręs krateris. Tarp vulkaninių formų gausu smūginių kraterių. Didžiausio jų skersmuo 275 km. Šio kraterio, kaip ir kai kurių kitų, dugnas užlietas lavos. Dėl to ir dėl atmosferinės erozijos (vėjas ir jo nešama smulki medžiaga) Veneros smūginiai krateriai yra lėkšti, negilūs. Mažesnių kaip 6 km kraterių nėra, nes palyginti maži meteoriniai kūnai spėja išgaruoti tankioje atmosferoje ir nepasiekia paviršiaus.

Kalnynai, aukšti plokščiakalniai aprėpia vos apie 10% Veneros paviršiaus. Aukštumų daugiausia yra šiauriniame planetos pusrutulyje. Čia esantis didžiausias plokščiakalnis, vadinamas **Ištarės žeme**, užima 1000 × 1500 km plotą. Jį supa kalnų virtinės, tarp jų **Maksvelio kalnai** su aukščiausia (11 km) viršūne visoje planetoje. Kitas didelis kalnų rajonas yra nusidriekęs 15 000 km palei planetos pusiaują ir yra iškilęs virš lygumų iki 5 km. Tai **Afroditės žemė**. Įstabus vadinamasis **Beta** rajonas. Jame puikuojasi 6 km aukščio **Rėjos** ir **Tėjos ugnikalniai**. Jų skersmuo ties pagrindų maždaug 800 km, o viršūnių įdubos siekia dešimtis km. Veneroje vulkaninė veikla aktyvesnė negu Žemėje. Tiesa, tiesioginių nuorodų į dabar veikiančius vulkanus Veneroje dar nerasta (tai



4.8 pav. *Veneros paviršiaus radiolokacinis vaizdas*

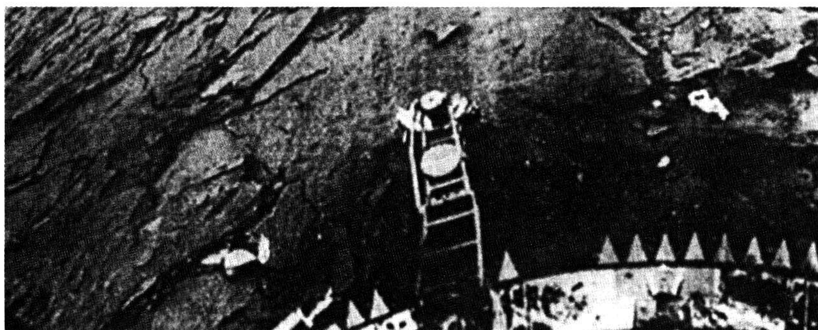
dar nereiškia, jog jų ten nėra), tačiau vulkaninių reiškinių pėdsakai akivaizdūs – lava padengti didžiuliai plotai. Lavos srautai nepaliaujamai keitė reljefo išvaizdą, ir šiandieną stebimo paviršiaus amžius tėra, matyt, keli šimtai milijonų metų.

Veneros paviršiaus struktūra liudija, jog globalinės plokščių tektonikos, kaip Žemės plutoje, ten nėra. Galbūt trūksta tam reikalingo plutos standumo. Tokioje plutoje vidinės šilumos ir magmos srautai gali sukelti lokalinius tektoninius procesus. Kad tokių iš tiesų esama, rodo vietovės, neįprastai turtingos įvairiomis detalėmis. Ten matyti paviršiaus klostės, sprūdys, lūžiai, plyšiai, vingiuoja ilgi ir platūs lavos kanalai. Vietinio aktyvumo sritys yra arti kalnuotų rajonų, tad jie galbūt yra ilgalaikės vulkaninės veiklos padarinys.

Nuleidžiamųjų aparatų, pasiekusių Veneros paviršių, nuotraukose matyti sustingusios lavos plokštės, išbarstyti įvairaus dydžio aštriabriauniai akmenys bei smulkiagrūdės medžiagos danga (**4.9** pav.). Tirtų Veneros uolienų cheminė sudėtis artima Žemės bazaltams.

Veneros debesys kybo tankioje atmosferoje. Prie pat paviršiaus atmosferos slėgis lygus 9 MPa. Čia dujų tankis vos 15 kartų mažesnis už vandens tankį. Veneros atmosferos cheminė sudėtis visiškai nepanaši į Žemės oro sudėtį. 96% jos tūrio sudaro **anglies dioksidas**. Antroje vietoje yra azotas (apie 3%), ir visiškai mažai erdvės lieka argonui, heliui, sieros dioksidui, anglies monoksidui, vandenilio chloridui bei kt. dujoms. Kelia nuostabą, kad Veneroje labai maža vandens – jo ten apie 10 000 kartų mažiau negu Žemėje. Visas jis yra atmosferoje, ir vandens garai tesudaro apie 0,2% jos tūrio.

Veneros debesys labai smarkiai sklaido Saulės šviesą. Šios planetos sferinis albedas – 0,76 – yra didžiausias Saulės sistemoje. Debesys dalį energijos dar ir sugeria, todėl paviršių apšviečia (apšvieta čia kaip Žemėje debesuotą dieną) ir šildo tik keli procentai pasiekusios planetą šviesos. Nežiūrint to, temperatūra Veneros paviršiuje siekia 730 K! Taip yra dėl stipraus **šiltnamio reiškinio**, kuriam atsirasti Veneros atmosfera labai tinkama (CO_2, H_2O, SO_2 molekulės smarkiai sugeria infraraudonąją spinduliuotę). Dėl atmosferos cirkuliacijos pa-



4.9 pav. *Veneros paviršius iš arti*

viršiaus temperatūra beveik (10 K ribose) nepriklauso nuo platumos bei paros meto. Sezoninių kitimų Veneroje nėra, nes jos sukimosi ašis nėra pakrypusi į orbitos plokštumą. Kylant nuo paviršiaus aukštyn temperatūra greitai krinta ir 90–100 km aukštyje pasiekia minimumą – 170 K. Termosferoje, kur dujų tankis visiškai mažas, temperatūra vėl kyla ir aukščiau 170 km pašoka vidutiniškai iki 650 K. 140–150 km aukštyje aptinkama didžiausia elektronų koncentracija (dieninėje pusėje apie $6{\cdot}10^{11}$ m^{-3}). Kadangi Veneros negaubia magnetinis laukas, Saulės vėjo įtaką tiesiogiai patiria jos atmosfera. Saulės vėjas suspaudžia jonosferą dieninėje planetos pusėje ir ištempia ją, kaip kometos uodegą, naktinėje pusėje. Kartu jonosfera sutrikdo Saulės vėją, aplink ją magnetinis laukas darosi stipresnis negu tarpplanetinėje erdvėje.

Veneros debesys pasklidę 45–65 km aukštyje. Jie yra šiek tiek susisluoksniavę. Apatinis tankiausias debesų sluoksnis (aukštis ~50 km) tvyro labiau kaip migla, o viršutiniame (~60 km) jau išryškėja tam tikros struktūrinės detalės, regimos ultravioletinėje srityje. Abu sluoksnius skiria lengva miglelė. Debesų prigimtis dar nėra visai aiški. Sprendžiant pagal debesų optines savybes, juos greičiausiai sudaro 1–3 μm dydžio 80% sieros rūgšties skiedinio lašeliai. Tokių lašelių tankiose debesų vietose turėtų būti $2\text{–}3{\cdot}10^{8}$ m^{-3}. Apatiniame sluoksnyje kybo ir stambesnių (5–15 μm) dalelių, tarp jų galbūt ir sieros kristalėlių. Pirmieji aerozoliai Veneros atmosferoje aptinkami maždaug 35 km aukštyje, toliau jų koncentracija didėja ir perauga į apčiuopiamus debesis. Vidutinė temperatūra debesų lygyje yra 270 K.

Veneroje nepaliaujamai pučia rytų vėjas. Jo greitis viršutinių debesų lygyje yra apie 100 m/s, taigi debesys apskrieja planetą per 4 dienas. Leidžiantis artyn paviršiaus, vėjo greitis mažėja ir prie pat paviršiaus sumažėja iki 1–2 m/s. Vėjo greičio dedamoji planetos ašigalių kryptimis daug mažesnė. Tokios Veneros atmosferos cirkuliacijos priežastys dar neatskleistos.

Venera ir Žemė panašios dydžiu ir vidumi, tačiau pasauliai virš šių planetų plutų visiškai skirtingi. Kažkada planetų evoliucijos keliai išsiskyrė. Galėjo lemti Veneros artumas Saulei. Karšti Saulės spinduliai neleido kondensuotis vandens garams, jie disocijavo, vandenilis paliko planetą, o deguonis susijungė su planetos plutos medžiaga. Nebuvo skysto vandens, nebuvo kur ištirpti anglies dioksidui, ir jis liko atmosferoje, susidarė puikiausios sąlygos šiltnamio reiškiniui rastis. Šitaip susiklostė nepakeliamo karščio, gniuždančio slėgio ir nuodingų dujų su sieros rūgšties debesimis derinys – tikras pragaras grožio ir meilės deivės vardu pavadintoje planetoje.

Veneros paviršiaus dariniams suteikiami deivių, mitologinių būtybių bei šiaip pasižymėjusių moterų vardai. Tarp jų yra ir lietuviškų: **Neringos** rajonas, **Audros** ir **Undinės** lygumos, **Lados** žemė, **Vakarinės** slėnis, **Aušros, Auskos, Brėkštos, Laumės, Raganos, Saulės, Vaivos** ir **Žlėjos** kalnynai, **Gabijos** ir **Vaidilutės** terasos, **Lazdonos, Medeinės** ir **Žvėrynės** kanjonai, **Gegutės, Giltinės, Laimos** ir **Verpėjos** teseros (taisyklingos formos kalnagūbrių tinklai), **Javinės, Krūminės**

ir **Žemynos** kalnų vainikai, **Praurimės** banguota sritis, **Birutės, Dainos, Danutės, Gražinos, Janinos, Nomedos, Ugnės, Virgos** ir **Živilės** krateriai, **Aleksotės, Eglės, Mildos, Nijolės** kalnai, **Žemaitės** vulkaninis kalnas.

4.6. MARSAS IR JO PALYDOVAI

Kitas Žemės kaimynas rausvasis Marsas skrieja aplink Saulę gana ekscentriška orbita, kurios didysis pusašis lygus 1,524 av (228 mln. km). Marsui stebėti ypač tinka laikotarpiai, kai jis yra didžiojoje opozicijoje, t. y. opozicijoje (žr. **2.3**), kuri vyksta Marsui esant perihelyje. Tąsyk nuotolis tarp Žemės ir Marso sumažėja iki 56 mln. km.

Marso sukimosi ašies posvyris į orbitos plokštumą (64°,8) ir sukimosi periodas (24^h37^m) labai primena Žemę. Taigi Marse, kaip ir Žemėje, vyksta metų laikų kaita, tiktai jų trukmė beveik du kartus ilgesnė, nes Marsas Saulę apskrieja per 687 mūsų paras. O para Marse vos šiek tiek ilgesnė už mūsiškę.

Marsas 1,9 karto mažesnis už Žemę: jo pusiaujinis spindulys lygus 3397 km, o ašigalinis maždaug 20 km trumpesnis. Mase Žemė lenkia Marsą 9,3 karto. Marso vidutinis tankis – 3930 kg/m^3 – daug mažesnis už Žemės ir vos truputį didesnis už Mėnulio. Vadinasi, ir jo vidus skiriasi nuo Žemės – turi būti mažesnis mažesnio tankio branduolys. Šiaip, analogiškai kitoms Žemės grupės planetoms, Marso gelmių sandaros modeliuose minima **pluta**, silikatų **mantija** ir geležies bei geležies sulfido mišinio **branduolys**. Greitas planetos sukimasis, atrodo, teikia pakankamas sąlygas (pagal Žemę) susikurti gana stipriam magnetiniam laukui. Deja, vientiso magnetinio lauko Marsas neturi, tėra tik silpni lokaliniai laukai. Ko gero, tai yra kadaise egzistavusio planetos dipolinio magnetinio lauko liekanos, išsilaikiusios geležies turtingose uolienose. Maža planeta, matyt, jau prieš maždaug 4 milijardus metų spėjo atvėsti tiek, kad užgestų elektros srovės branduolyje.

Iš žemės pro teleskopą matyti Marso paviršiaus nevienodumas. 2/3 planetos paviršiaus užima šviesios raudonai oranžinės sritys, vadinamos **žemynais**. Kitą paviršiaus dalį sudaro įvairaus dydžio ir formos tamsūs laukai, kurie vadinami **jūromis**, **įlankomis**, **ežerais**. Dalijimasis į šviesias ir tamsias sritis priklauso nuo to, kaip paviršius atspindi šviesą. Tamsios vietos iš tikrųjų yra irgi rausvos, tačiau dėl kontrasto su šviesiomis sritimis stebėtojui atrodo žalsvai pilkos. Tyrinėtojų dėmesį iš karto patraukia baltos dėmės ties planetos ašigaliais. Šios dėmės vadinamos ***ašigalinėmis kepurėmis***.

Marso vaizdas priklauso nuo metų laikų. Ašigalinės kepurės žiemą pasiekia net 50° platumą, tačiau vasarą sunyksta iki mažos dėmelės, o dažnai ir visai pranyksta. Žiemą tamsios sritys yra ne tokios kontrastingos kaip vasarą ar rudenį. Įdomiai vyksta šie sezoniniai kitimai. Jūrų patamsėjimas prasideda pavasarį prie pradedančios mažėti ašigalinės kepurės. Vėliau jūrų pa-

tamsėjimo banga plinta pusiaujo link maždaug 30 km per parą greičiu ir, baigiantis vasarai, net pereina į kitą pusrutulį. Rudenį kontrastas tarp žemynų ir jūrų vėl pradeda menkėti, ir taip viskas kartojasi metai iš metų, nors kartais iškyla ir naujų detalių ar dingsta senų. Tokius sezoninius Marso paviršiaus kitimus dar XX a. pradžioje buvo bandoma aiškinti augmenijos suvešėjimu vasarą ir jos sunykimu rudenį.

Marso nuotraukose iš arti, kurias atsiuntė TE, kokių nors aiškių skirtumų tarp šviesenių ir tamsesnių paviršiaus rajonų nematyti (optine iliuzija pasirodė besą „kanalai“, kadaise garsinę Marsą). Užtat matyti daugybė įvairiausių geologinių paviršiaus formų, kurias formavo tektoniniai procesai, vulkaninė veikla, stambių meteorinių kūnų smūgiai, vėjas ir galbūt tolimoje praeityje vanduo (**4.10** pav.).

Pietinis ir šiaurinis Marso pusrutuliai turi skirtingą gamtovaizdį. Pietiniame pusrutulyje gausu smūginių kraterių. Pasitaiko kraterių iki 300 km skersmens ir dar didesnių. Ko gero, čia esančias milžiniškas įdubas taip pat išmušė labai dideli meteoriniai kūnai. Didžiausios tokios įdubos (**Elados**) skersmuo 2100 km, o gylis 6 km. Ją supa 2 km aukščio kalnai. Marso krateriai yra lėkštesni negu Mėnulio ar Merkurijaus, jie yra apirę, paveikti ilgalaikės vėjo, vandens ir ledo erozijos. Daugelio dugnuose matyti vėjo suneštos dulkių kopos. Išmargintas kraterių plokščias pietinis Marso pusrutulis mena labai ankstyvus planetos evoliucijos laikus, jo darinių amžius didesnis nei 2 milijardai metų.

Šiaurinis pusrutulis vidutiniškai 5 km žemesnis už pietinį ir yra gerokai jaunesnis. Čia senų kraterių nedaug, kiti užlieti prasiveržusios lavos, kurios tekėta labai daug. Čia stovi praeities karščio liudininkai – užgesusių vulkanų

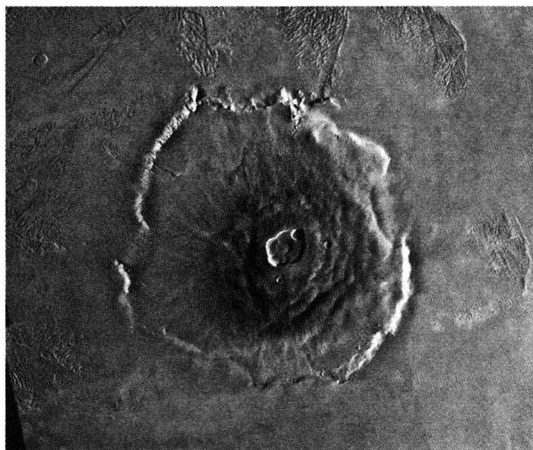


4.10 pav. *Marso nuotrauka iš orbitos*

kūgiai. Jie spiečiasi prie dominuojančio šiame pusrutulyje 4000 km skersmens ir kai kur siekiančio 10 km aukštį **Tarsijos plokščiakalnio**. Kalnyną vainikuoja keturi milžiniški vulkanai, didžiausi visoje Saulės sistemoje. Tai **Arsija**, **Askrėja**, **Olimpas** ir **Povas**. Virš aplinkinių lygumų Olimpo viršūnė iškilusi iki 27 km (**4.11** pav.). Šio vulkano papėdės skersmuo 600 km, o viršūnės kraterio 25 km. Jo gylis 3 km. Šiaurės ašigalio srities lygumos yra žemiausios visoje planetoje. Jose dažnai matomi pratisi smėlio kopų laukai. Apskritai Marso paviršiuje aukščų skirtumas yra net 30 km.

Nuostabiai atrodo 4000 km ilgio, vidutiniškai 100 km pločio ir vietomis 6 km gylio **Marinerio kanjonas**. Jis nutisęs išilgai pusiaujo. Kanjono šlaitai pamažu yra, ir jis platėja, vietomis pasirodo sluoksniuoto grunto atodangos. Marinerio slėnis – tai plutos lūžis, lokalinės tektonikos padarinys. Globalinės plokščių tektonikos Marse niekada nebuvo, antraip būtų susiklosčiusios kalnų grandinės, o jų nėra. Matyt, lėmė per stora pluta: geologai mano ją esant apie 120 km. Tik tokia pluta gali išlaikyti Tarsijos kalnyno masę. Plutos įtampą šioje srityje rodo radialinės sprūdys bei kitokios deformacijos.

Marso paviršiuje ypač atkreipia dėmesį vingiuoti slėniai, labai primenantis išdžiūvusių upių vagas. Jie būna iki 1500 km ilgio ir iki 100 km pločio. Beveik nėra abejonės, jog Marse vagas išgraužė tekantis vanduo. Yra visi tekėjimo požymiai – intakai, salelės, seklumos, sąnašos žiotyse. Tačiau Marso senvagės labiau panašios į tas Žemėje esančias vagas, kurias palieka staiga atsiradę galingi vandens srautai, pavyzdžiui, per potvynius ar liūtis. Kokios priežastys sukeldavo staigius ir trumpus potvynius Marse, sunku pasakyti. Rasta ir lėtai tekėjusio vandens poveikio žymių. Galop kai kuriose įdubose matyti banguotas reljefas, labai primenąs ežerų ar negilių jūrų dugną. Dabar Marse skysto vandens negali būti – paviršiuje per mažas slėgis ir per maža temperatūra.



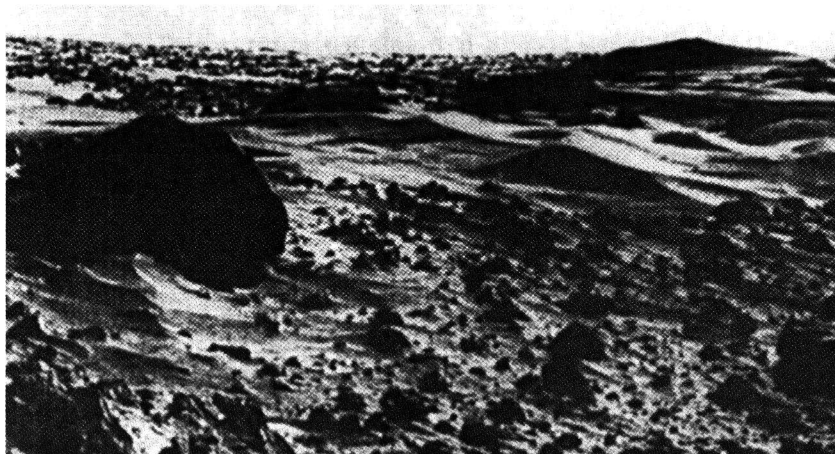
4.11 pav. *Olimpo kalnas Marse*

Upės ir ežerai išseko prieš šimtus milijonų metų, o prieš tai ten, matyt, buvo šilčiau, ir planetą dengė tankesnė atmosfera.

Atrodo, daug vandens Marse yra amžinojo įšalo sluoksnyje, galbūt aprėpiančiame visą planetą. Apie jo buvimą liudija gana aiškūs gruntinio ledo tirpimo (atšilus klimatui, pasirodžius ugnikalniui ar nukritus meteoriniam kūnui) pėdsakai, rasti daugelyje Marso paviršiaus vietų. Pavyzdžiui, kai kurios upių vagos su smėlio sąnašomis išeina iš didelių ir gilių paviršiaus įgriuvų arba daugelio smūginių kraterių šlaituose yra nutekėjusio purvo žymės.

Kitas vandens rezervuaras Marse – ledinės ašigalinės kepurės. Šiaurinės kepurės skersmuo 1200 km, vidutinis storis 1 km, nors vietomis išauga iki 3 km. Ledinės kepurės kraštuose įsirėžę iki 1 km gylio kanjonai. Laiptuoti ledyno šlaitai rodo jo sluoksniuotą struktūrą. Tokį ledyno formavimąsi galėjo sukelti, pavyzdžiui, cikliški klimato svyravimai. Šiaurinės Marso kepurės ledai sudaro tik 4% Antarktidos ledų masės. Pietinė Marso ašigalinė kepurė daug mažesnė ir kitokios struktūros. Joje galbūt daug CO_2 ledo. Tame planetos pusrutulyje, kur yra žiema, ledinė kepurė ir aplinkinės sritys pasidengia daugiausia anglies dioksido (mažiau vandens garų) šerkšnu. Vasarą šerkšnas (ypač CO_2) dingsta, ir taip vyksta stebimi sezoniniai ašigalinių kepurių kitimai

Nuleidžiamųjų aparatų („Viking-1, -2“, „Pathfinder“) perduotose panoramose Marso paviršius atrodo kaip nyki oranžiškai raudona dykuma, aplinkui tik įvairaus dydžio akmenys ir smėlio pusnys (**4.12** pav.). Būdingą Marsui rausvumą teikia grunte esantis geležies oksidas (rūdys). Aparatų nusileidimo vietose matyti didelio vandens kiekio nutekėjimo žymės: terasos, išgraužos, smulki medžiaga tarsi surūšiuota į žvyrą, smėlį, sąnašas. Akmenis išbarstė vulkanų išsiveržimai, meteorinių kūnų sukelti sprogimai. Dažniausiai tai vulkaniniai bazaltai.

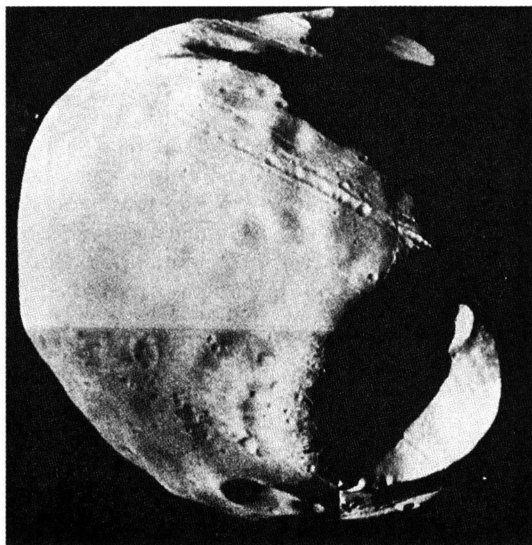


4.12 pav. *Marso paviršius iš arti*

Marso atmosfera labai reta. Jos slėgis vidutiniame Marso paviršiaus lygyje tik 600 Pa, t. y. toks, koks Žemės atmosferos 40 km aukštyje. Didžiąją atmosferos dalį užima **anglies dioksido** dujos – maždaug 95%. Apie 2,5% sudaro azoto molekulės, 1,5% – argono atomai. Kitą tūrio dalį užpildo deguonies, anglies monoksido ir vandens garų molekulės. Marso atmosfera labai sausa: vandens garų visiškai nedaug (jų kiekis labai priklauso nuo metų laikų). Kaip matyti, Marso atmosferos cheminė sudėtis labai panaši į Veneros atmosferos sudėtį, tačiau tankių skirtumas – didžiulis.

Šiltnamio reiškinys Marse dėl atmosferos retumo nereikšmingas. Pusiaujo aplinkoje dieną, kai Marsas yra perihelyje, temperatūra paviršiuje pakyla iki 300 K (afelyje 50 K mažiau), o paryčiui nukrinta iki 180 K. Tokį didelį dienos ir nakties temperatūrų skirtumą lemia mažas atmosferos ir paviršiaus šiluminis imlumas. Marso ašigaliuose žiemą temperatūra būna apie 140 K, t. y. mažesnė kaip CO_2 užšalimo taškas (147 K). Todėl čia rudenį iškrinta anglies dioksido (jo gausu atmosferoje) šerkšnas, o pavasarį jis garuoja ir nyksta. Marso atmosferos temperatūra kylant aukštyn mažėja iki vidutiniškai 140 K 60–100 km aukštyje. Po to temperatūra vėl didėja ir 200 km aukštyje jau yra 300 K. Dar aukščiau temperatūra beveik nesikeičia. Čia daugiausia yra atominio vandenilio. Didžiausias elektronų tankis Marso jonosferoje yra maždaug 150 km aukštyje. Čia jų dieną esti apie 10^{10} m^{-3}, o naktį apie 10^9 m^{-3}. Saulės vėjas tempia ir plėšia jonosferą, nes planeta neturi apsaugančio magnetinio lauko.

Didelis temperatūros gradientas ties Marso paviršiumi, temperatūrų skirtumas dieninėje ir naktinėje planetos pusėse sukelia stiprius vėjus, kurių greitis kartais pasiekia 100 m/s (šiaip apie 10 m/s). Vėjas gainioja smilteles iš vienos



4.13 pav. *Marso palydovas Fobas*

vietos į kitą, o jam ypač sustiprėjus, smulkiausios (~1 μm) dulkelės pakyla aukštai ir pakimba atmosferoje. Tada Marse matyti geltoni debesys. Kartais, paprastai kai Marsas būna arčiausiai Saulės, ***dulkių audra*** aprėpia visą planetą, ir praeina keli mėnesiai, kol dulkelės nusėda ant paviršiaus. Per tokias audras smėlio sūkuriai, pasiekiantys net 50 km aukštį, uždengia Marso paviršių, ir jo stebėjimai pasidaro neįmanomi. Susmulkintos medžiagos pernešimu bandoma aiškinti minėtus Marso jūrų kontrasto sezoninius kitimus. Be abejo, vėjo nešamas smėlis glotnina ir ardo paviršiaus darinius.

Kartais Marso atmosferoje pasirodo kitokie – balti – debesys. Tai jau dujų kondensacijos dariniai. Virš ašigalinių sričių ir labai aukštai (aukščiau kaip 20 km), t. y. ten, kur temperatūra pakankamai žema, debesys susidaro kondensuojantis anglies dioksido dujoms. Žemus debesis, ypač ties planetos pusiauju, formuoja vandens ledo kristalėliai. Kartkartėmis tokie debesys susisuka į spirales – ciklonus. Žiemą ašigalines kepures dažnai gaubia migla iš anglies dioksido ir vandens garų.

Dabar Marso paviršius – sausa ir šalta smėlio kopų ir akmenų dykuma. Tačiau yra daug nuorodų, kad kadaise Marsą gaubė tankesnė ir šiltesnė atmosfera, jame tyvuliavo jūros (lygus ir žemas šiaurinis pusrutulis, ko gero, yra jūros dugnas) ir ežerai, paviršių plovė upių vandenys. Tada galėjo atsirasti ir gyvybė. Kai kurios primityvios jos formos galėjo ištverti nepalankią gyvybei planetos evoliuciją ir išlikti iki šių dienų. Juk žinoma, kad gyvybė aptinkama net pačiose atšiauriausiose Žemės vietose. Tiesioginių biologinės veiklos požymių Marse ieškojo nutupdyti „Viking“ aparatai. Jeigu grunte yra mikroskopinių augalėlių ar mikroorganizmų, jame būtinai turėtų reikštis medžiagų apykaita. Susekti tokią apykaitą ir buvo pabandyta. Eksperimentai tarsi parodė, jog Marse gyvybės nėra, tačiau visiškai tikro atsakymo dar nepateikė. Kiti tyrimai, be abejo, atskleis šią Marso paslaptį.

Marsas turi du mažus netaisyklingos formos (pailgus) palydovus, vadinamus ***Fobu*** ir ***Deimu***. Jie matyti tik pro didelį teleskopą. Fobas (27×21×19 km) skrieja 9400 km atstumu nuo Marso centro, Deimas (15×12×11 km) – 23 500 km atstumu. Abu skrieja beveik planetos pusiaujo plokštumoje ir visą laiką atsukę į ją vieną šoną. Palydovai išmarginti kraterių daug smarkiau negu pats Marsas (**4.13** pav.). Fobe yra krateris, kurio skersmuo net 10 km. Krateriai Marso palydovuose aiškiai rodo jų smūginę kilmę, nes mažuose kūnuose vulkaninė veikla neįmanoma. Abu palydovai labai tamsūs – atspindi vos 2% šviesos. Tai, matyt, yra asteroidų tipo kūnai (žr. **4.12**). Fobą dengia maždaug metro storio smulkių dulkelių sluoksnis.

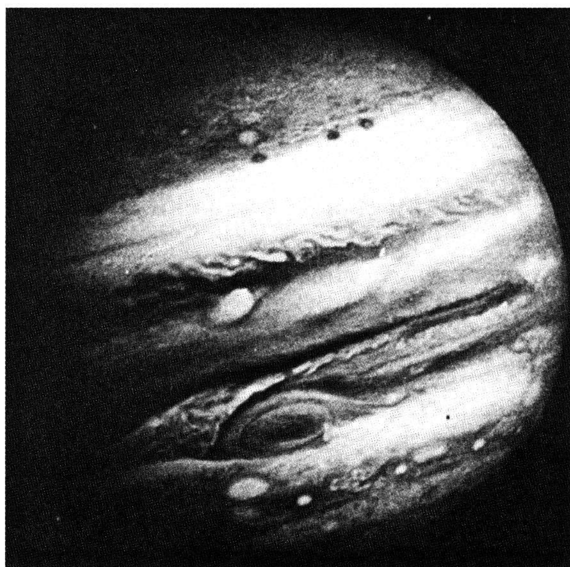
Didieji Marso krateriai vadinami planetos tyrėjų vardais, o mažesniems suteikiami Žemės miestų vardai. Marse yra **Gusevo** (XIX a. Vilniaus astronomas) ir **Alytaus** krateriai.

4.7. JUPITERIS IR JO PALYDOVAI

Už Marso orbitos esančios kitos 4 planetos yra visiškai kitokios. Jas nuo Žemės grupės planetų skiria didelė masė, didelis tūris, mažas vidutinis tankis, cheminė sudėtis, didelis vidinės šilumos srautas, greitas sukimasis apie ašį, didelis paplokštumas, stiprus magnetinis laukas, daug palydovų, žiedų sistema. Šių planetų milžinių prototipu yra Jupiteris. Jo vidutinis nuotolis nuo Saulės 5,2 av, o apskriejimo periodas 11,9 Žemės metų.

Jupiteris – didžiausia ir masyviausia Saulės sistemos planeta. Jo masė yra 2,5 karto didesnė už visų kitų planetų bendrą masę, tačiau tesudaro tik 1/1047,5 Saulės masės. Pusiaujinis šios planetos spindulys lygus 71 500 km, o ašigalinis spindulys 4400 km trumpesnis, t. y. planeta gerokai suplota (tai matyti jau pro mažą teleskopą). Vidutinis Jupiterio tankis 1330 kg/m^3 .

Regimasis vidutinis Jupiterio skersmuo lygus 40″. Jo paviršiuje matyti gausybė įvairios formos ir atspalvio detalių, bet visos yra kintamos ir paprastai laikinos. Vadinasi, regimasis Jupiterio paviršius – tai debesys, plaukiojantys planetos atmosferoje. Labiausiai krinta į akis tamsios rausvos juostos, lygiagrečios planetos pusiaujui (didžiajai regimosios elipsės ašiai), ir jas atskiriančios šviesios zonos. Juostose ir zonose gausu darinių, liudijančių audringų procesų vyksmą Jupiterio atmosferoje (**4.14** pav.). Pačių juostų pavidalas po metų kitų neatpažįstamai pasikeičia. Tačiau Jupiteryje yra darinių, kurie ganėtinai patvarūs. Štai jau per 300 metų astronomai stebi rausvą ovalo pavidalo 40 000 km ilgio ir 14 000 km pločio dėmę, kuri yra pietiniame planetos pusru-



4.14 pav. *Jupiteris*

tulyje maždaug 20° atstumu nuo pusiaujo. Tai vadinamoji **Didžioji Raudonoji Dėmė**. Jos ryškumas, pavidalas, skaistis, atspalvis smarkiai kinta, bet apskritai ji nepasislepia tarp aplinkinių kintančių detalių. Tai milžiniškas atmosferos **sūkurys**, kurio prigimtis primena žemiškuosius ciklonus.

Jupiteris labai greitai sukasi apie savo ašį. Pusiaujinės sritys apsisuka per $9^h50^m30^s$ (regimojo paviršiaus taškų linijinis greitis 12,7 km/s), o vidutinėse platumose apsisukimo periodas maždaug 5^m didesnis. Nevienodas kampinis greitis dar kartą patvirtina, kad matome ne kietą Jupiterio paviršių, o debesų sluoksnį. Kad Jupiteris turi greitai suktis, aišku ir iš to, kad jis labai suplotas. Greitu sukimusi paaiškinama ir juostuota planetos debesų struktūra. Vėjai, pernešantys šilumą iš pusiaujo į ašigalių sritis, dėl greito planetos sukimosi apie ašį (Koriolio jėga) nukrypsta lygiagrečiai pusiaujui. Kai kur vėjai pučia 100 m/s ir didesniu greičiu. Jupiterio sukimosi ašis su orbitos plokštuma sudaro 87° kampą, t. y. beveik statmena jai. Vadinasi, metų laikų kitimo Jupiteryje praktiškai nėra.

Jupiterio atmosferoje virš debesų daugiausia (99,5%) yra vandenilio ir helio (procentinis santykis maždaug kaip Saulėje), taip pat rasta metano (CH_4), amoniako (NH_3), vandens garų (H_2O) ir kt. junginių molekulių. Slėgis viršutinių debesų lygyje $5 \cdot 10^4$ Pa, o temperatūra čia apie 135 K. Jeigu Jupiterį (jo albedas 0,50) šildytų tik Saulės spinduliai, jo temperatūra turėtų būti mažesnė. Didelis šilumos srautas plūsta iš planetos vidaus: Jupiteris išspinduliuoja energijos 2 kartus daugiau, negu gauna jos iš Saulės. Tuo Jupiteris primena žvaigždę, tačiau centrinės dalies įšilimo mechanizmas yra visai kitas – Jupiterio vidus įkaito (įkaista) jam traukiantis, kai gravitacinė energija virsta šilumine. Iš apačios sklindanti šiluma sukelia vertikalias oro sroves, kurios komplikuoja cirkuliaciją atmosferoje ir regimų debesų išvaizdą. Karštesnės oro masės kyla į viršų (tai vyksta šviesiose zonose), o atvėsusios ir įgavusios rausvinančių (sieros ir fosforo) junginių, leidžiasi žemyn (tai vyksta tamsiose juostose). Įvairios prigimties srovių sąveikoje ir formuojasi nepaprastai sūkuringas Jupiterio regimasis paviršius.

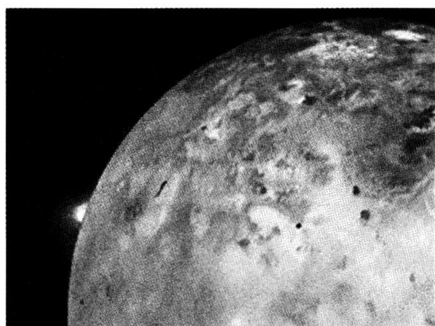
Jupiterio debesys yra kelių sluoksnių: viršutinį sudaro amoniako kristalėliai, po juo vilnija amonio hidrosulfido (NH_4SH) kristalėliai ir dar žemiau – galbūt vandens garai.

Jupiterį supa stiprus **magnetinis laukas** – apie 20 kartų stipresnis už Žemės lauką. Tarp magnetinės ašies ir planetos sukimosi ašies yra 9°,6 kampas. Jupiterio magnetosferos spindulys didesnis už pačios planetos spindulį maždaug 100 kartų, o naktinėje pusėje nutįsta net už Saturno orbitos. Magnetinio lauko pagauti ir sulaikyti Saulės vėjo elektronai ir protonai sudaro galingus Jupiterio **radiacijos žiedus**. Greiti elektronai, judantys magnetiniame Jupiterio lauke, spinduliuoja decimetrines radijo bangas. Tai **sinchrotroninis spinduliavimas** (žr. **6.7.4.1**). Sritis, stipriausiai spinduliuojanti šio radijo diapazono bangas, yra apie 3 kartus didesnė už pačią planetą.

Jupiteris yra ne tik decimetrinių bangų, bet ir labai stiprus dekametrinių bangų šaltinis. Šiame diapazone Jupiterio radijo spinduliavimas susideda iš atskirų žybsnių serijų, kurios trunka nuo keleto minučių iki kelių valandų. Sporadinis radijo spinduliavimas atsiranda lokalizuotose Jupiterio paviršiaus vietose, tačiau ar tai audrų padarinys, dar neaišku.

Kai kuriose naktinės Jupiterio pusės vietose TE registruoja **žaibų** sukeltą švytėjimą. Žaibuojama srityse, kur mažas slėgis ir aktyvi atmosferos cirkuliacija – ciklonuose. Arti konvekcijos centro pasirodo šviesūs, greičiausiai vandens, **audros debesys**. Šie debesys turėtų pažerti lietaus ar sniego, nes žaibams rastis reikia kritulių. Arti Jupiterio ašigalių, kaip ir Žemėje, matyti **polinės pašvaistės**.

Kas yra po Jupiterio šaltais debesimis, galima spręsti tik teoriškai. Teorinis planetos sandaros modelis turi kiek galint labiau atitikti stebimas planetos savybes. Modeliuojant svarbiausia smarkiai nesuklysti parenkant planetos cheminę sudėtį. Pagal mažą vidutinį tankį ir atmosferos sudėtį galima manyti, kad Jupiterio cheminė sudėtis tokia pat kaip Saulės, t. y. jame vyrauja vandenilis ir helis. Leidžiantis į planetos gelmes, kai sparčiai didėja slėgis ir

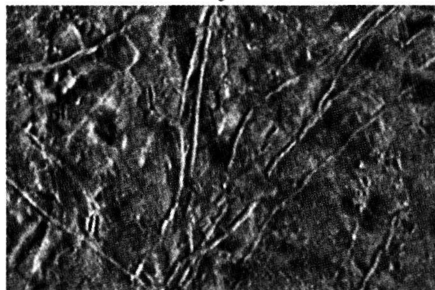


a

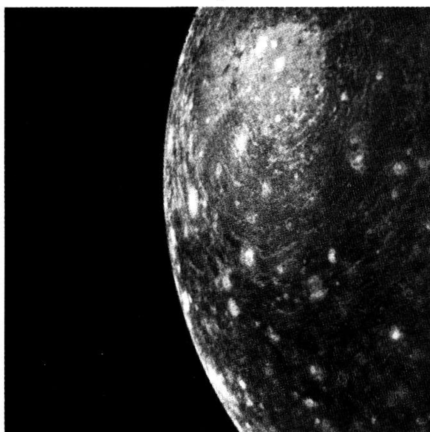


b

c



d



4.15 pav. *Jupiterio didžiųjų palydovų nuotraukos: a – Ija, b – Ganimedas, c – Europa, d – Kalista*

kyla temperatūra, tokios sudėties medžiagos savybės kinta, ji sluoksniuojasi. Šiuolaikiniuose Jupiterio modeliuose minimi trys sferiniai sluoksniai. Pirmajame sluoksnyje dujinė **vandenilio ir helio atmosfera** vis tankėja ir pamažu pereina į skystį. Taigi maždaug 1000 km gylyje prasideda **skysto molekulinio vandenilio** sluoksnis. Maždaug 20000 km gylyje, kai slėgis pasiekia $3{\cdot}10^{11}$ Pa, molekulinis vandenilis keičia fazę, virsta **skystu metaliniu vandeniliu** (protonų ir laisvųjų elektronų mišiniu). Galbūt kaip tik šiame, elektrai laidžiame, storame metalinio vandenilio sluoksnyje atsiradusios ir greito planetos sukimosi sustiprintos elektros srovės sukuria stebimą Jupiterio magnetinį lauką. Šis laukas sukasi kartu su planeta $9^h55^m30^s$ periodu. Reikia manyti, kad tai yra viso Jupiterio kūno (o ne tik išorinių debesų) sukimosi apie ašį periodas. Pagaliau prieinamas maždaug 14 000 km spindulio planetos **branduolys**, kuriame nusėdę įvairūs junginiai su sunkesniais elementais. Tai kietųjų uolienų (silikatų) bei amoniako, metano ir vandens ledų mišinys. Jupiterio centre temperatūra siekia 25 000 K, o slėgis – $7{\cdot}10^{12}$ Pa.

Iki 2003 m. vidurio rasta 61 Jupiterio palydovas. Jie skrieja tarp 0,13 ir 28 mln. km nuo planetos centro. Trys palydovai, Ganimedas, Kalista ir Ija didesni už Mėnulį, o Europa truputį mažesnė už jį. Ganimedas apskritai yra didžiausias palydovas visoje Saulės sistemoje: jis dydžiu pralenkia net Merkurijų. Šiuos keturis didžiuosius Jupiterio palydovus atrado G. Galilėjus, nes jie matomi pro mažą teleskopą ar žiūroną. Galilėjaus palydovų rikiuotė tokia: arčiausiai planetos yra Ija, toliau Europa, Ganimedas ir Kalista. Kiti Jupiterio palydovai daug mažesni (nuo 200 iki 1 km) ir, matyt, nesferiški.

Didieji Jupiterio palydovai (**4.15** pav.) skrieja planetos pusiaujo plokštumoje beveik apskritiminėmis orbitomis tiesiogine, t. y. planetos sukimosi apie ašį kryptimi. Šių palydovų apskriejimo aplink planetą periodas sutampa su apsisukimo apie ašį periodu. Taigi jie skrieja aplink Jupiterį atsigręžę į jį visada ta pačia puse.

Didžiųjų palydovų vidutinis tankis mažėja tolstant nuo Jupiterio, bet visų yra didesnis už pačios planetos vidutinį tankį. Štai Ijos vidutinis tankis 3570 kg/m^3, o Kalistos – jau 1850 kg/m^3. Tatai rodo, kad jų vidus nėra vienodas. Ne mažiau įvairūs ir šių palydovų paviršiai.

Ija (skersmuo 3640 km) – unikalus palydovas. Jo paviršiuje TE aptiko apie 300 kelių kilometrų aukščio veikiančių ugnikalnių, iš kurių dideliu greičiu išmestos dujos ir dulkės pakyla iki 200 ir daugiau km. Tai pirmieji aktyvūs vulkanai, rasti už Žemės ribų. Nuotraukuose dar matyti dešimtys tuo tarpu neveikiančių kalderų. Vulkanų paskleistos sieros dioksido dujos aukštai stingsta ir šerkšnu krinta ant paviršiaus. Pro vulkanų kraterių žiotis liejasi išsilydžiusi siera ir jos junginiai, kurie nudažo palydovo paviršių oranžine spalva. Išsiliejusios sieringos lavos ežerai ir nusėdusios vulkaninės dulkės visą laiką keičia Ijos paviršių. Lava užlieja smūginius kraterius, ir jų nematyti.

Iją turėtų sudaryti gana didelis metalinis branduolys, karšta išsilydžiusi silikatų mantija ir plona vulkaninių nuosėdų užklota pluta. Ijoje vandens nėra. Pagrindinės Ijos gelmių įkaitimo priežastys, galimas daiktas, yra dvi: Jupiterio, Ganimedo ir kaimyninės Europos potvyninių jėgų sukeliamos deformacijos bei elektros srovės, atsirandančios palydovui skriejant stipriame Jupiterio magnetiniame lauke. Ija turi labai retą vulkaninės kilmės atmosferą: aptikta (be sieros dioksido) natrio, kalio, deguonies ir sieros atomų. Be to, išilgai palydovo orbitos išsibarstę sieros ir deguonies jonai. Kai Ija pasislepia Jupiterio šešėlyje, matomas jos dujinio apvalkalo silpnas įvairiaspalvis švytėjimas. Jį žadina energingos Jupiterio radiacijos juostų dalelės ir elektringų dalelių srautai, jungiantys Iją su Jupiterio jonosfera. Ija neturi savo dipolinio magnetinio lauko.

Europa (skersmuo 3140 km) labai gerai atspindi Saulės šviesą. Jos paviršiuje tarp šviesių sričių maišosi rausvoki plotai. Tačiau labiausiai į akis krinta tamsios, ilgos, dažnai persipynusios juostos – dešimčių kilometrų pločio ir kartais tūkstančių kilometrų ilgio plyšiai. Tokių plyšių raizgalynė labai primena smarkiai suaižėjusį ledą. Plyšiai yra negilūs, užpildyti drumzlina sustingusia medžiaga. Daugelyje vietų paviršius grublėtas, primenąs netvarkingas ledo lyčių sangrūdas. Šiaip Europos paviršius yra labai lygus, ir nėra abejonės, jog tai užšalęs okeanas. Ledas skylinėja veikiant Jupiterio ir gretimų palydovų potvyninėms jėgoms. Ledo deformacijas gali sukelti vidinė palydovo šiluma. Smūginių kraterių Europoje nedaug. Vadinasi, jie buvo užliejami, t. y. vyko palyginti spartus paviršiaus atsinaujinimas. Matomos apvalios tamsokos dėmės, matyt, atsirado prasiveržus į paviršių purvinam vandeniui. Apskritai viskas panašu į tai, kad po Europos ledu dar ir dabar slūgso vandenynas. Jam sustingti neleidžia vidinė šiluma (tolimoje praeityje Europos vandenis šildė dar nespėjęs atvėsti pats Jupiteris). Dar vienu poledinio vandens Europoje įrodymu gali būti jos, nors ir silpnas, magnetinis laukas. Jį gali sukelti elektros srovės, indukuotos sūriame vandenyne, kai jį veikia kintantis pačios centrinės planetos magnetinis laukas. Europos gravitacinio lauko tyrimai bei vidutinis tankis rodo, kad jos centre tūno metalinis branduolys, virš jo yra silikatų mantija, o šią jau dengia 100–150 km storio drumzlino vandens sluoksnis, išorėje padengtas kelių kilometrų ledo pluta. Tikėtina, jog po ledu, šiltesniame vandenyje, egzistuoja primityvi gyvybė. Europos ledinį paviršių gaubia labai reta deguonies atmosfera. Deguonis atsiranda irstant vandens molekulei, kai į ledą smogia greitos elektringos kosminės dalelės ar jį apšviečia trumpabangiai Saulės spinduliai. Lengvi vandenilio atomai išsilaksto, o sunkesnis deguonis lieka ties paviršiumi.

Ganimedo (skersmuo 5270 km) paviršius nėra toks lygus kaip Europos, tačiau didesnių kalnų irgi nėra. Jame matyti tamsokos lygumos, primenančios Mėnulio jūras, įvairiai išsidėsčiusių lygiagrečių iškilimų ir griovų laukų sritys, šviesūs dryžiai, blizgančios dėmelės – neseniai atsiradę smūginiai krateriai.

Smūginių kraterių Ganimede apskritai gausu, ypač tamsesniuose, tarytum dulkėtuose, rajonuose. Tai rodo, jog čia nevyko jokių didesnių kitimų per 3–4 milijardus metų. Pagal paviršiaus darinių išvaizdą galima spręsti, jog Ganimedą taip pat dengia ledas. Ledo raukšlės, trūkiai ir kiti dariniai byloja apie kadaise buvusi Ganimedo geologinį aktyvumą. Panašu, kad dabar jame skysto vandens nebėra, vanduo įšalęs iki pat silikatinės mantijos ir sudaro maždaug 800 km storio ledo plutą. Ganimedo centrinę sritį užima kietas metalinis branduolys, o visą palydovą dar gaubia labai reta deguonies atmosfera ir 40 kartų silpnesnis negu Žemės magnetinis laukas. Jo kilmė dar neaiški.

Išskirtinė **Kalistos** (skersmuo 4810 km) ledinio paviršiaus savybė – gausybė lėkštų smūginių kraterių. Tai rodo, kad paviršius yra labai senas, t. y. niekada smarkiai nesikeitė, nors nedidelės darinių erozijos, atrodo, esama (trūksta mažų kraterių). Manoma, jog Kalistos vidus yra nediferencijuotas: tai tiesiog uolienų ir ledo mišinys. Tačiau yra nuorodų į sudėtingesnę Kalistos struktūrą, net į poledinio vandenyno galimybę. Mat aptiktas silpnas palydovo magnetinis laukas. Kalista turi labai retą anglies dioksido dujų atmosferą.

Maži ir tolimi Jupiterio palydovai skrieja ištęstomis orbitomis, kurių plokštumos jau gerokai pasvirusios į Jupiterio pusiaujo plokštumą, o patys tolimiausi palydovai skrieja dargi priešinga kryptimi. Ko gero, šiuos palydovus Jupiteris kadaise pasigavo iš šalies.

Jupiterį nuo pat debesų iki maždaug 200 000 km nuotolio nuo jo centro juosia plonas (mažesnio kaip 30 km storio) smulkių (~10 μm) kietų dalelių ***žiedas***. Jupiterio žiedas yra labai retas, ir tik dviejose vietose matyti sutankėjimai. Viena 800 km pločio didesnio tankio juosta yra 128 500 km atstumu, o kita 6000 km pločio, – truputį arčiau planetos. Iš Žemės Jupiterio žiedas nematomas – jo dalelės blogai atspindi šviesą. Manoma, jog žiedo dulkelės atsiranda mažuose vidiniuose Jupiterio palydovuose, kai jų paviršius čaižo smulkios tarpplanetinės dalelės. Išsilaisvinusios dulkelės ima skrieti aplink Jupiterį ir pamažu spirale artėja prie jo – susidaro žiedas.

4.8. SATURNAS IR JO PALYDOVAI

Vidutiniame 9,6 av nuotolyje 29,5 mūsų metų periodu aplink Saulę skrieja Saturnas – antroji pagal dydį planeta Saulės sistemoje (pusiaujinis spindulys 60 300 km). Jis daugeliu atžvilgių panašus į Jupiterį, tik dar labiau suplotas per ašigalius, o vidutinis tankis – 690 kg/m^3 – pats mažiausias iš visų Saulės sistemos narių. Saturno paviršiuje taip pat matyti šviesios zonos ir tamsios juostos bei kitokie dariniai, tačiau jų mažiau negu Jupiteryje, be to, jie visi yra ne tokie kontrastingi ir spalvingi. Aišku, tai, ką matome, yra Saturno debesys, kurių prigimtis panaši į Jupiterį dengiančių debesų prigimtį. Kartais planetos diske pasirodo balti sūkuringi debesys, rodantys, kokie nepaprastai sudėtingi procesai vyksta jos atmosferoje (**4.16** pav.). Remiantis detalių,

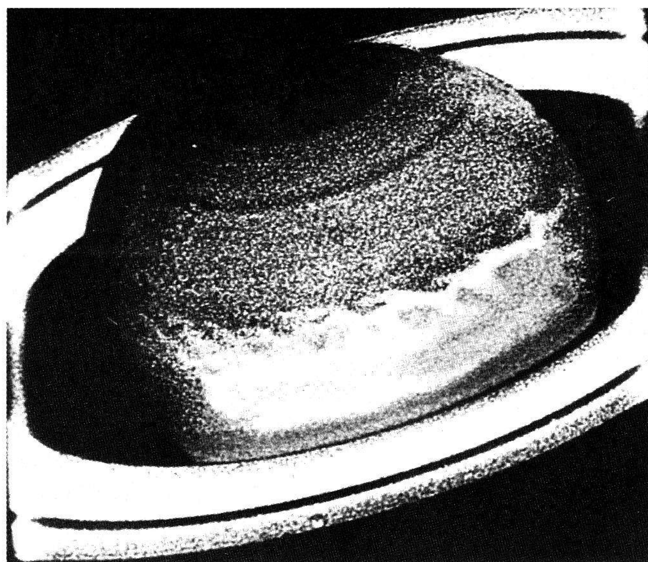
esančių prie planetos pusiaujo, stebėjimais, nustatyta, kad Saturnas apie ašį apsisuka per 10^h14^m. Tolstant nuo pusiaujo, regimojo paviršiaus kampinis greitis mažėja, vidutinėse platumose sukimosi periodas jau 10^h39^m. Vėjo greitis ties pusiauju siekia 500 m/s.

Saturno temperatūra vidutiniame debesų aukšte 95 K. Tolima Saulė negalėtų tiek įšildyti. Taigi Saturnas, kaip ir Jupiteris, turi dideles vidinės šilumos atsargas. Jis išspinduliuoja (infraraudonoje srityje) du kartus daugiau energijos negu gauna jos iš Saulės. Saturno atmosferoje daugiausiai yra vandenilio ir helio, truputį amoniako, metano, acetileno (C_2H_2), etano (C_2H_6) ir vandens garų.

Saturno **magnetinis laukas** ir **radiacijos žiedai** silpnesni negu Jupiterio, bet stipresni už Žemės. Magnetinė ašis beveik sutampa su planetos sukimosi ašimi. Saturno magnetosferoje atsirandančios radijo bangos yra silpnos.

Saturno cheminė sudėtis turėtų būti panaši į Jupiterio. Taigi šios planetos yra panašios ir savo vidine sandara, tik mažesnis Saturno vidutinis tankis rodo, kad jame gerokai storesnis yra skysto **molekulinio vandenilio** sluoksnis ir plonesnis **metalinio vandenilio** sluoksnis. Silikatų bei vandens, metano ir amoniako ledų branduolio centre temperatūra turi būti 20 000 K, o slėgis $5 \cdot 10^{12}$ Pa.

Iki XXI a. pradžios rasta **31 Saturno palydovas**. Artimiausių planetai palydovų orbitų plokštumos yra artimos Saturno pusiaujo plokštumai. Kai kurie palydovai skrieja poromis tomis pačiomis orbitomis. Toliausiai nuo centrinės planetos skriejančio palydovo nuotolis 23 mln. km. Didžiausias Saturno palydovas yra Titanas, jo skersmuo lygus 5150 km. Keturių palydovų skersmenys

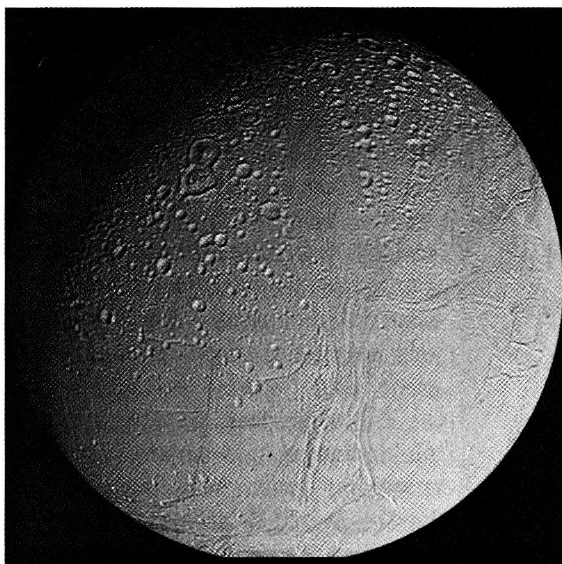


4.16 pav. *Audra Saturne*

nuo 1100 iki 1500 km. Kiti gerokai mažesni, jų skersmuo nuo 500 iki 10 km. Dauguma jų yra netaisyklingos formos. Daugelis palydovų yra visuomet atsisukę ta pačia puse į Saturną (sinchroniškas sukimasis). Daugumos palydovų paviršiai gerai atspindi Saulės šviesą, padengti ledu. Daugumos lediniai paviršiai išmarginti gausių smūginių kraterių. Taigi šie palydovai per visą savo ilgą istoriją nėra patyrę kiek didesnių sukrėtimų.

Pagal poveikį TE judėjimui nustatyta daugelio Saturno palydovų masė, o kartu ir jų vidutiniai tankiai. Didžiausią tankį (1900 kg/m^3) turi Titanas, o kitų – svyruoja tarp 600 ir 1400 kg/m^3. Tokie skaičiai rodo, kad šių palydovų didžiąją dalį sudaro ledas, o mažesnę – uolienos. Patys mažiausi palydovai, ko gero, yra tiesiog ledo luistai. Kai kurie Saturno palydovai turi neįprastų savybių.

Gausioje Saturno palydovų šeimoje išsiskiria **Titanas**. Dydžiu jis nedaug tenusileidžia Jupiterio palydovui Ganimedui. Titanas – vienintelis Saulės sistemoje palydovas, turįs tirštą ir storą atmosferą. Ji sudaryta daugiausia iš azoto (85%), dar yra argono, metano ir visai mažai etano, acetileno, etileno ir kt. Atmosferoje keliais aukštais tvyro reti debesėliai (jų sudėtis neaiški), suteikiantys Titanui raudonai oranžinį atspalvį. Netoli paviršiaus galėtų kyboti lietingi metano debesys. Patį paviršių pro atmosferą įžvelgti pavyksta tik infraraudonuose spinduliuose. Matomos šviesios ir tamsios sritys. Galima manyti, kad šviesios sritys – tai ledas, susimaišęs su dulkėmis ir akmenimis, o tamsios – skystų angliavandenilių (metano, etano ir kt.) ir azoto jūros. Ties Titano paviršiumi slėgis apie $1{,}5 \cdot 10^5$ Pa, o jo temperatūra 94 K.



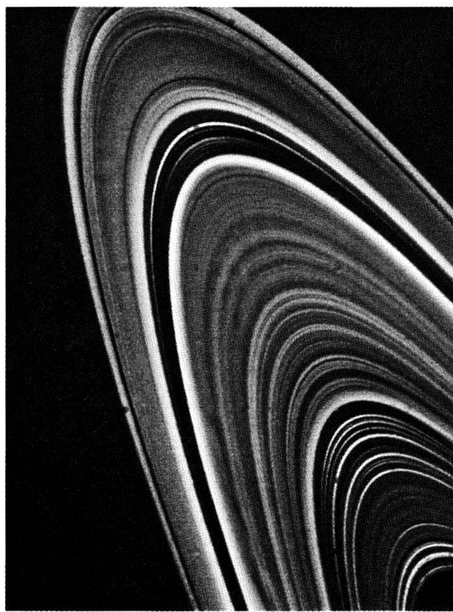
4.17 pav. *Saturno palydovas Enceladas*

Kai kuriose **Encelado** (skersmuo 500 km) vietose smūginių kraterių maža, bet jų vietoje matomos ilgos griovos, lūžiai, sustingę medžiagos srautai (**4.17** pav.). Panašu, kad čia ledinį paviršių tirpdė ir atnaujino šiluma, plūstanti iš palydovo vidaus. Vidinio aktyvumo šaltiniu galėtų būti gretimų palydovų sukeltos potvyninės jėgos.

Paskutinysis didesnis Saturno palydovas **Febė** (skersmuo 220 km) daug kuo nepanašus į artimesnius palydovus. Jo orbitos plokštuma gerokai pakrypusi į Saturno pusiaujo plokštumą, skrieja priešinga kryptimi, sukasi nesinchroniškai, yra labai tamsus (albedas tik 0,05). Panašu, jog tai kitur atsiradęs kūnas, tik vėliau Saturno pagrobtas.

Labai keistai atrodo Febės kaimynas **Japetas** (skersmuo 1440 km). Vienas jo šonas labai tamsus (kaip Febės), o kitas normaliai šviesus! Tamsus šonas yra tas, kuris, skriejant palydovui savo orbita, visada yra priešaky. Šis faktas patvirtina spėjimą, kad Japeto ledus dengia sugauta suodina medžiaga, kurią pažeria tamsioji Febė, kai ją daužo meteoriniai kūnai.

Saturną garsina įspūdinga ***žiedų*** sistema, kurią galima pamatyti jau ir pro mažą teleskopą. Tiesa, šiuo atveju žiedas atrodo vientisas. Didesnės skiriamosios gebos prietaisai suskaldo žiedą į tris juostas, į žiedus A (išorinį), B (vidurinį) ir C (vidinį). Žiedus skiria tamsios properšos. Ypač aiškiai matyti vadinamasis **Kasinio** (atradėjo pavardė) tarpas, t. y. 4500 km pločio tarpas tarp A ir B žiedų. B žiedas yra ryškiausias, o C žiedas yra blankus, dažnai vadinamas krepiniu. Šie trys žiedai (jų plotis 17 000–26 000 km) užima zoną tarp 72 000 ir 138 000 km nuo Saturno centro. Vėlesni tyrimai iš Žemės, o ypač iš TE atskleidė dar 4 visiškai blyškius žiedus. D žiedas įsiterpęs į C žiedo vidų ir beveik siekia centrinės planetos debesis. Siauri (šimtų km) F, G žiedai ir platus E žiedas gaubia A žiedą. E žiedo, arba visos žiedų sistemos, spindulys lygus maždaug 400 000 km. TE nuotraukose plačios žiedų juostos suskyla į tūkstančius siaurų koncentrinių žiedų, atskirtų taip pat siaurais tamsiais tarpais (**4.18** pav.). Žiedų storis tėra apie 2 km.



4.18 pav. *Saturno žiedų sistema iš arti*

Žiedai išsidėstę Saturno pusiaujo plokštumoje. Juos sudaro įvairiausių matmenų – nuo pačių mažiausių iki keleto metrų – dalelės, padengtos vandens ledu arba ištisai ledinės (gerai atspindi šviesą). Dalelės tarsi ma-

žyčiai palydovai skrieja savarankiškomis orbitomis, paklusdamos Keplerio dėsniams. Atokesni žiedai skrieja lėčiau negu esantys arčiau Saturno. Regimą Saturno žiedo struktūrą sąlygoja nevienoda dalelių koncentracija. Pastaroji niekur nėra tokia didelė, kad, pavyzdžiui, visiškai užgožtų už žiedo esančius objektus. Štai net šviesiausi A ir B žiedai tik kelis kartus susilpnina tolimųjų žvaigždžių šviesą. Bendra žiedų masė turėtų būti lygi vidutinio dydžio palydovo masei. Taigi pasklidusios dalelės yra, matyt, toji medžiaga, iš kurios turėjo formuotis nemažas Saturno palydovas, bet nesusiformavo. To neleido padaryti stipriai besireiškiančios arti planetos potvynių jėgos. Žiedų zonoje skrieja keli maži Saturno palydovai. Jie sąveikauja su kaimyninėmis žiedo dalelėmis, ir tai turi įtakos žiedų struktūrai.

Saturno žiedų matomumo sąlygos nuolat kinta. Mat jų išsidėstymo plokštuma su Žemės orbitos plokštuma sudaro 28° kampą, ir toji plokštuma, Saturnui skriejant aplink Saulę, lieka vienodai orientuota. Kai Žemė atsiduria žiedų plokštumoje, žiedai „dingsta“, nes tuo metu į stebėtoją yra atsukta tik siaura jų briauna. Tai kartojasi kas 14,7 metų (pusė Saturno apskriejimo periodo).

4.9. URANAS IR JO PALYDOVAI

Paprastai Uraną galima pamatyti tiktai pro teleskopą. Jo mažame melsvai žalsvame skritulėlyje praktiškai nieko įsimenančio nematoma. TE „Vojadžer-2“ skrydis pro Uraną (1986 m.) buvo kaip niekada naudingas. Planetos orbitos didysis pusašis lygus 19,2 av.

Uranas pagrįstai priskiriamas prie planetų milžinių, tačiau yra gerokai mažesnis už Jupiterį ir Saturną. Jo pusiaujinis spindulys 25 600 km, o ašigalinis 600 km trumpesnis. Vidutinis Urano tankis 1270 kg/m^3 .

Urano sukimosi ašis su jo orbitos plokštuma sudaro 98° kampą. Tai reiškia, kad sukimosi ašis beveik sutampa su orbitos plokštuma, o Urano sukimosi kryptis priešinga daugumos planetų sukimosi krypčiai. Savotiška sukimosi ašies padėtis sukelia planetoje įdomius Saulės padėties horizonto atžvilgiu kitimus. Per Urano metus (84 Žemės metus) Saulė būna zenite beveik visuose planetos rutulio taškuose (išskyrus platumas $|\varphi| > 82°$). Poliarinės dienos ir naktys pasiekia platumas $\varphi = \pm 8°$. Poliarinė diena ir naktis, pavyzdžiui, 60° platumoje Urane trunka 23 metus.

Uranas turi **magnetinį lauką** ir atitinkamai **radiacinius žiedus**, iš kurių plinta radijo spinduliuotė. Tarp Urano magnetinio dipolio ašies ir sukimosi ašies yra net 60° kampas. Remiantis radijo stebėjimais, nustatyta, jog Urano vidinės dalies (čia atsiranda magnetinis laukas) sukimosi periodas lygus 17^h14^m. „Vojadžer-2“ televizijos kameros pradėjo įžvelgti blankius Urano atmosferos darinius, kai iki planetos liko palyginti nedaug kelio. Taigi dabar galima teigti, kad Urano paviršiuje matomos labai neryškios lygiagrečios pusiaujui debesų juostos bei kiti maži dariniai. Debesų apsisukimo apie planetos ašį periodas



4.19 pav. *Urano palydovas Miranda*

priklauso nuo platumos – greičiau apsisuka sritys prie ašigalio. Periodai kinta plačiose ribose, būtent tarp 15 ir 17^h. Vadinasi, debesų kampinis greitis yra didesnis negu vidinių planetos sluoksnių. Debesis planetos sukimosi kryptimi veja stiprūs vėjai, nevienodi įvairiose platumose.

Debesų paviršiuje Urano temperatūra 58 K. Įdomu, kad temperatūra yra beveik vienoda visame paviršiuje, nors, kaip matėme, Saulė įvairias vietas apšviečia labai nevienodai. Viršutiniai Urano debesys – tai metano kristalėliai, nes šio junginio Urano atmosferoje yra daug. Metanas sugeria geltonuosius ir raudonuosius Saulės spindulius, todėl Urano atspindėtoje šviesoje ir vyrauja trumpesnių bangų spalvos (melsvos). Didžiausią Urano atmosferos dalį sudaro vandenilis. Be metano ir vandenilio, dar yra nemažai helio, amoniako.

Apie 30% energijos, kurią Uranas paskleidžia į aplinką, yra iš vidinių šilumos šaltinių. Tai daug mažiau kaip Jupiteryje ir Saturne. Nevienodai sudarytas šių planetų ir Urano vidus. Pagal Urano sandaros teorinius modelius po labai stora jo atmosfera **slūgso vandens, amoniako ir metano okeanas**, o dar giliau – palyginti nedidelis silikatų **branduolys**. Vandenilio Urane mažiau negu minėtose planetose. Jo centre temperatūra 11 000 K, o slėgis apie $5 \cdot 10^{11}$ Pa.

Atrastas **21 Urano palydovas**. Dauguma jų skrieja Urano pusiaujo plokštumoje planetos sukimosi apie ašį kryptimi. Artimiausieji 11 palydovų yra maži (30–160 km) netaisyklingos formos kūnai. Jie išsidėstę tarp 50 000 ir 86 000 km nuo Urano centro. 130–584 tūkst. km nuotolyje skrieja penki didžiausi Urano palydovai – jų skersmenys nuo 500 iki 1600 km, o vidutiniai tankiai nuo 1200 iki 1700 kg/m^3. Taigi šiuose apvaliuose kūnuose yra ir ledo, ir uolienų. Drumzlinas ledas teikia jų paviršiams pilką atspalvį. Smūginių kraterių gausumu, kitokiomis reljefo detalėmis Urano palydovai gerokai skiriasi vienas nuo kito. **Oberoną** (skersmuo 1520 km) dengia senas paviršius su daugybe kraterių, kurių dalis gali būti susieta su buvusia vulkanine veikla. Be to, matyti sprūdys, statūs šlaitai. **Titanijoje** (skersmuo 1580 km) taip pat daug smūginių kraterių, slenkančių ledynų požymių, įspūdingai atrodo platūs ir ilgi slėniai. **Umbrielio** (skersmuo 1170 km) paviršius nusėtas smūginių kraterių ir, atrodo, mena labai senus laikus. **Arijelio** (skersmuo 1160 km) išorė daug įvai-

resnė, ir panašu, kad, bėgant laikui, ji kito dėl vidinių procesų. Du Arijelio krateriai pavadinti lietuviškais **Deivės** ir **Rimos** vardais. Galbūt Saulės sistemoje nėra kito tokio palydovo, kurio paviršius būtų toks sudėtingas kaip **Mirandos** (skersmuo 480 km). Čia, be smūginių kraterių, gubrių, labai aukštų ir stačių skardžių, slėnių, lūžių, dar matomi keisčiausių formų dariniai, pavyzdžiui, tarytum plūgu išvagoti laukai (**4.19** pav.). Kyla klausimas: kokia prigimtis reiškinių, kurie taip sudarkė tokio mažo palydovo paviršių?

Kiti maži palydovai yra labai toli nuo Urano: už daugelio milijonų kilometrų. Greičiausiai tai yra svetimi kūnai, kažkada patekę į Urano traukos lauką.

Dviejų artimiausiųjų Urano palydovų orbitos gaubia paskutinįjį Urano **žiedą**, kurių iš viso yra 11. Urano žiedai yra labai siauri – keli ar kelios dešimtys kilometrų, o tarpai tarp jų labai dideli. Visos žiedų sistemos plotis apie 9000 km: jos vidinis spindulys 42 000 km, o išorinis – 51 000 km. Žiedai skrieja Urano pusiaujo plokštumoje.

Iš Žemės optiniuose spinduliuose Urano žiedai nematomi (jie buvo aptikti pagal žvaigždės spindesio sumažėjimą, kai ją užstoja žiedas). Priežastis aiški – jie atspindi vos 2–3% Saulės šviesos. Luistų, sudarančių žiedus, paviršiai juodi kaip suodžiai. Patys luistai turėtų būti kelių metrų dydžio, labai smulkių dalelių turi būti nedaug. Bandoma aiškinti, kad žiedų kūnelių (artimų žiedams palydovų paviršių) juodumas atsiranda dėl elektringų dalelių iš radiacinių žiedų smūgių. Pastarieji suardo paviršiuje esančias metano molekules ir išlaisvina anglį.

Urano žiedų medžiagos užtektų 15 km skersmens palydovui susidaryti.

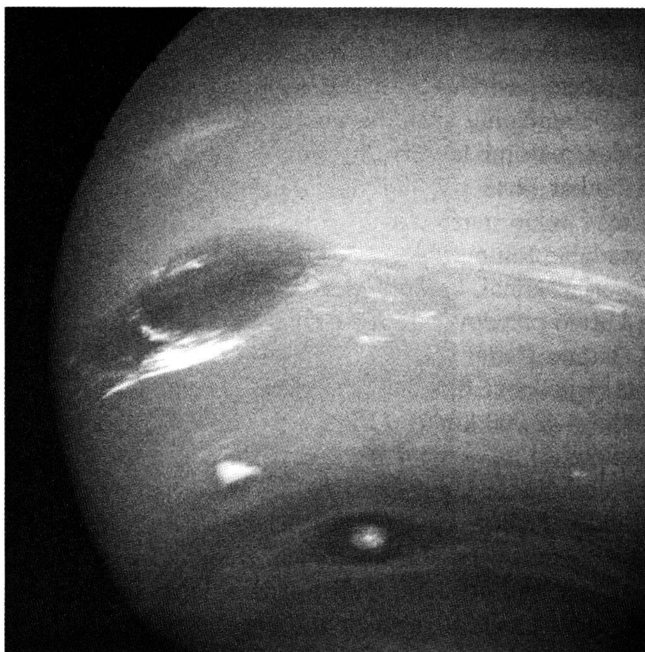
4.10. NEPTŪNAS IR JO PALYDOVAI

Neptūno orbita vidutiniškai yra už 30 av nuo Saulės. Apibėgti ją planetai prireikia 165 Žemės metų.

„Vojadžer-2" pagalba 1989 m. tolimasis plika akimi nematomas Neptūnas tapo neblogai ištirta planeta. Neptūnas vos truputį mažesnis už Uraną: pusiaujinis jo spindulys lygus 24 800 km, o ašigalinis – 24 300 km. Neptūno vidutinis tankis 1640 kg/m^3.

Neptūno **magnetinio lauko**, silpnesnio negu Žemės ar Urano, ašis su sukimosi ašimi sudaro didelį (47°) kampą. Pagal reiškinius, sukeltus magnetinės ašies precesijos aplink sukimosi ašį, nustatyta, kad giluminiai Neptūno sluoksniai sukasi 16^h6^m periodu. Iš paviršinių darinių stebėjimų gautieji duomenys kiek kitokie.

Mėlynai žaliame (metano įtaka) Neptūno skritulyje detalių matyti nedaug, tačiau visos jos rodo stiprią atmosferos cirkuliaciją (**4.20** pav.). Pietiniame planetos pusrutulyje kurį laiką buvo labai gerai matyti tamsi dėmė, didumo sulig Žeme. Šis milžiniškas sūkurys priminė Didžiąją Raudonąją Dėmę Jupiteryje. Jis buvo pavadintas **Didžiąja Tamsiąja Dėme**. Atsirandančios ir dingstančios



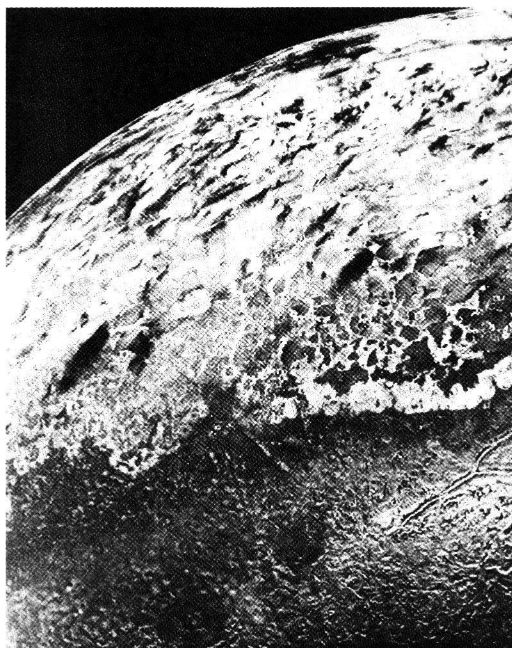
4.20 pav. *Neptūnas*

šviesios ir tamsios dėmės rodo, kad Neptūne siaučia uraganiniai vėjai, kurių greitis vietomis išauga iki 400–700 m/s. Vėjų kryptis – priešinga planetos sukimosi krypčiai. Taigi atmosferinių reiškinių aktyvumu Neptūnas smarkiai pranoksta Uraną ir panašus į Jupiterį. Kita Neptūno ypatybė, skirianti jį nuo kitų planetų milžinių – baltų debesų, panašių į plunksninius Žemės debesis, pasirodymai. Jie atsiranda 50–100 km aukštyje virš pagrindinių (amoniako) debesų sluoksnio ir galbūt yra iš metano.

Neptūno atmosferos dinamiškumas sietinas su vidinės šilumos srautu, kuris yra daug stipresnis negu Urane. Temperatūra planetos paviršiuje 56 K, o slėgis debesų lygyje $1{,}2\cdot10^5$ Pa. Neptūno atmosferoje daug vandenilio, mažiau helio ir visai mažai metano. Ultravioletiniuose spinduliuose matyti **polinės pašvaistės.**

Neptūno kietas branduolys gal yra didesnis negu Urano, nes jo vidutinis tankis didesnis, o šiaip šių dviejų planetų vidaus sandara turėtų būti panaši.

Dabar žinomi 11 Neptūno palydovų. Jie skrieja tarp 48 tūkst. ir 22 mln. km nuo Neptūno centro. Tarp neseniai atrastų palydovų didžiausias – 420 km skersmens – yra **Protėjas.** Kiti yra visai nedideli (30–190 km), nesferiški, išvarpyti meteorinių kūnų smūgių. Seniau atrasti palydovai, maža **Nereidė** (skersmuo 340 km) ir didžiausias Neptūno mėnulis **Tritonas** (skersmuo 2710 km), turi daug keistenybių. Abiejų orbitos sudaro didelį kampą su Neptūno orbitos



4.21 pav. *Neptūno palydovas Tritonas*

plokštuma. Nereidės orbita turi rekordiškai didelį ekscentricitetą – 0,75. Jos nuotolis nuo planetos kinta nuo 1,4 iki 9,6 mln. km. Tritonas skrieja apskritimu (už 355 000 km), tačiau priešinga kryptimi. Prie kitų planetų taip daro tik maži palydovai. Pagrįstai klausiama, ar nebus šie du kūnai pasiglemžti iš kitur? Ne mažiau intriguojanti yra Tritono paviršiaus išvaizda (**4.21** pav.).

Tritono paviršius padengtas kanjonų, ilgų iškilimų, kraterių ir pan. Gausu išsiliejusios ir sustingusios medžiagos pėdsakų. Susidaro įspūdis, kad Tritonas išgyveno audringą geologinę istoriją. Dabar nepaprastai šaltą jo paviršių (37 K) gaubia labai reta azoto atmosfera. Dar viena keistenybė – Tritone atrasti veikiantys vulkanai. Veikiau tai **geizeriai** – azoto, suspausto po ledine palydovo danga, prasiveržimai. Pagal Tritono vidutinį tankį, kuris lygus 2050 kg/m^3, galima spręsti, jog jį sudaro kietų uolienų branduolys ir metano bei vandens ledo mantija. Paviršius padengtas metano ir azoto ledu.

Neptūnas turi 4 iš Žemės nematomus **žiedus**. Du žiedai yra siauri (15–50 km), bet palyginti šviesūs, kiti du daug platesni ir retesni. Išoriniame žiede – jo spindulys 62 900 km – matyti trys padidėjusio atspindžio lankai, vadinami arkomis. Kaip jos atsirado ir kodėl nesuyra – rimti klausimai dangaus mechanikai. Neptūno žieduose yra daug dulkelių. Arti žiedų skrieja du Neptūno palydovai, jų trauka „gano“ tų žiedų daleles. Vidinio žiedo spindulys 42 000 km.

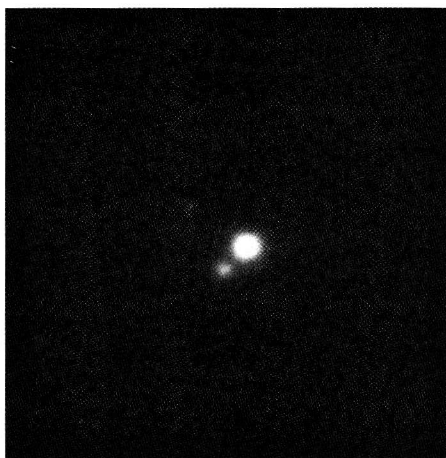
4.11. PLUTONAS IR CHARONAS

Paskutiniąją Saulės sistemos planetą Plutoną galima matyti tik pro didelį teleskopą. Žinios apie šią tolimąją planetą skurdokos, juolab kad jos dar nepasiekė nė vienas TE. Vis dėlto, panaudojus efektyvias stebėjimo priemones, pastaraisiais metais pavyko nustatyti bent pagrindinius Plutono bruožus.

Plutono skersmuo 2274 km, masė 0,002 Žemės masės, vidutinis tankis 2060 kg/m^3. Tokioje mažoje ir tolimoje planetoje ką nors įžiūrėti labai sunku. Spektro tyrimai rodo, kad Plutoną gaubia visiškai reta metano, anglies monoksido ir azoto atmosfera, o pats paviršius nuklotas tų dujų ledu. Čia temperatūra apie 40 K. Pagal Plutono spindesio kitimą nustatyta, jog jis apie ašį apsisuka per $6^d9^h17^m$. Per tą patį laiką aplink Plutoną apskrieja ir apie savo ašį apsisuka (sinchroninė orbita ir sinchroninis sukimasis) vienintelis žinomas jo palydovas ***Charonas*** (**4.22** pav). Vadinasi, abu kūnai visą laiką yra atsisukę vienas į kitą ta pačia puse, t. y. skrieja aplink bendrą masių centrą tarsi būtų sujungti nematomo strypo.

Charono orbitos spindulys 19 130 km, o jo paties skersmuo maždaug 1200 km. Palydovo masė vos 6,5 karto mažesnė už paties Plutono masę. Taigi šioje sistemoje palydovas mažai tesiskiria nuo centrinio kūno, ir ją pagrįstai galima laikyti dvinare planeta. Tai unikalus atvejis Saulės sistemoje (šia prasme antroje vietoje yra sistema Žemė–Mėnulis). Vis dėlto paviršiaus chemine sudėtimi Charonas nepanašus į Plutoną, jo spektre vyrauja vandens ledo požymiai, o to visiškai nėra Plutone. Šie du kūnai, ko gero, susidarė atskirai ir tik vėliau, atsitiktinai suartėję, susijungė.

Dydžiu ir mase Plutoną lenkia net 7 planetų palydovai (Mėnulis, Ganimedas, Kalista, Ija, Europa, Titanas ir Tritonas). Pagal vidutinį Plutono tankį galima spręsti, kad ir savo vidumi jis panašus į planetų milžinių palydovus, tačiau savarankiška orbita verčia jį vadinti planeta. Tiesa, Plutono orbita nėra įprasta: ji turi didelį ekscentricitetą ($e = 0{,}246$) ir smarkiai pakrypusi į ekliptikos plokštumą ($i = 17°$). Dėl didelio Plutono orbitos ištęstumo jos perihelis yra arčiau Saulės negu Neptūno. XX a. pabaigoje, kai Plutonas įskriejo į šią orbitos dalį, kraštine Saulės sistemos planeta laikinai buvo Neptūnas. Dar viena Plutono keistenybė – sukimosi apie ašį kryptis kitokia negu daugumos planetų.



4.22 pav. *Plutonas ir Charonas pro didelį teleskopą*

Galima manyti, kad Plutonas pla-

neta tapo kitaip negu kitos didžiosios planetos. Galbūt Plutonas priklausė Neptūno šeimai, kadaise patyrusiai katastrofą (pavyzdžiui, pro šalį pralėkė masyvus kūnas). Kaip tos katastrofos aidas galėtų būti neįprastas kai kurių Neptūno palydovų elgesys, pavyzdžiui, atvirkštinis Tritono (visais požiūriais panašaus į Plutoną) judėjimas.

Devintoji, laikoma paskutine, Saulės sistemos planeta – Plutonas – aplekia Saulę per 248 Žemės metus. Jo vidutinis nuotolis nuo Saulės 39,5 av arba beveik 6 milijardai kilometrų. Tai, ko gero, iš tikrųjų didžiųjų planetų pasaulio riba – dešimtosios planetos paieškos lieka be rezultatų.

4.12. ASTEROIDAI

XVIII a. antrojoje pusėje matematikas Johanas Ticijus (*J. D. Titius*) sugalvojo, o astronomas Johanas Bodė (*J. E. Bode*) (abu iš Vokietijos) paskelbė empirinę formulę, kuri išreiškia vidutinį planetos nuotolį nuo Saulės astronominiais vienetais:

$$r = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n, \tag{4.1}$$

čia $n = -\infty$ Merkurijui, $n = 0$ Venerai, $n = 1$ Žemei ir t. t. Ši formulė dabar vadinama ***Ticijaus ir Bodės taisykle***. Kaip atstumai, apskaičiuoti pagal šią taisyklę, atitinka tikruosius planetų atstumus, parodyta **4.1** lentelėje.

4.1 lentelė. **Ticijaus ir Bodės taisyklė**

Planeta	n	Apskaičiuotasis nuotolis, av	Tikrasis nuotolis, av
Merkurijus	$-\infty$	0,4	0,39
Venera	0	0,7	0,72
Žemė	1	1,0	1,00
Marsas	2	1,6	1,52
(Asteroidai)	3	2,8	(2,2–4,3)
Jupiteris	4	5,2	5,20
Saturnas	5	10,0	9,56
Uranas	6	19,6	19,19
Neptūnas	7	38,8	30,11
Plutonas	8	77,2	39,53

Matyti, kad apskaičiuoti ir realūs rezultatai neblogai sutampa, išskyrus kraštines planetas Neptūną ir Plutoną (tuo metu jos dar nebuvo žinomos). Dar vienas įdomus dalykas – trūksta planetos su $n = 3$. 1801 m. sausio 1 d. naktį italų astronomas Džuzepė Pjacis (*G. Piazzi*) aptiko šviesulį, lėtai slenkantį tarp žvaigždžių. Apskaičiavus jo orbitą gauta $a = 2,77$ av, t. y. šviesulys puikiai tiko Ticijaus ir Bodės lentelės spragai užpildyti. Naujoji planeta buvo pavadinta **Cerera**. Tačiau netrukus paaiškėjo, kad esama daugiau panašios orbitos objektų. Pro teleskopą (plika akimi nematomi) jie atrodė kaip žvaigždė, be mažiausio skritulėlio. Tai reiškė, kad naujai atrastos planetos yra mažų matmenų.

Jas imta vadinti ***mažosiomis planetomis***, arba ***asteroidais*** (gr. *aster* – žvaigždė + *eidos* – pavidalas).

Nuo XIX a. antrosios pusės asteroidų sąrašas pradėjo sparčiai ilgėti. Ypač tai pasakytina apie amžiaus pabaigą, kai asteroidų paieškai ir tyrimui buvo panaudota fotografija. Jeigu teleskopas valdomas pagal žvaigždes, tai dėl orbitinio judėjimo asteroidas nuotraukoje brėžia brūkšnelį ir tuo atkreipia dėmesį. Naujai atrastam asteroidui, kai sužinoma tiksli orbita, suteikiamas eilės numeris ir vardas. Vardą sugalvoja atradėjas. Iš pradžių buvo imami moteriški vardai iš mitologijos, vėliau šiaip moteriški vardai, dar vėliau šalių, miestų pavadinimai, įžymių žmonių pavardės, jei vyriškos giminės, pridedant moterišką galūnę (pvz., Niutonija). Vyriški vardai buvo suteikiami tik ypatingos orbitos asteroidams. Dabar, suteikiant asteroidams vardus, nebesilaikoma tokių taisyklių. Yra trys asteroidai su lietuviškais vardais: 2420 **Čiurlionis**, 2577 **Lietuva** ir 3072 **Vilnius**.

Iki 2002 m. sunumeruota per 30 000 asteroidų, o iš viso, sukūrus automatizuotas paieškos sistemas, jų pastebėta apie 150 000. Dauguma jų skrieja tarp Marso ir Jupiterio orbitų vidutiniu atstumu nuo Saulės tarp 2,2 ir 4,3 av. Ši plati juosta vadinama ***asteroidų žiedu***. Asteroidų orbitos yra įvairios, tačiau jų plokštumų posvyris į ekliptiką paprastai esti mažesnis kaip 20° ir ekscentricitetas mažesnis kaip 0,2. Vis dėlto yra asteroidų, kurie nepaklūsta bendram dėsningumui. Kai kurių asteroidų orbitų periheliai yra Žemės grupės planetų srityje, o afeliai ties Jupiteriu ar toli už jo. Tokios orbitos labai primena kometų (žr. **4.13**) orbitas. Priešingai, yra asteroidų, kurie net afelyje nepasiekia asteroidų žiedo. Asteroidai, kurie ties periheliu patenka į Žemės orbitos vidų, priskiriami **Apolono grupei** (Adonis, Hermis, Ikaras ir kt.). **Amūro grupės** asteroidų perihelis yra tarp Marso ir Žemės orbitų (Erotas, Seneka ir kt.). Pagaliau rasta asteroidų, kurių visa ar beveik visa orbita telpa Žemės orbitos viduje – tai **Atono grupė**. Šių grupių asteroidai kartais atsiduria netoli Žemės (1 mln. km ir mažiau).

1977 m. buvo pastebėtas asteroidų tipo objektas (pavadintas **Chironu**), skriejantis tarp Saturno ir Urano orbitų. Vėliau tarp Jupiterio ir Neptūno orbitų atrasta dar apie 20 tokių kūnų. Jie buvo pavadinti **kentaurais**. Galbūt jie labiau panašūs į kometų branduolius negu į įprastus asteroidus ir turi sąsajų su Koiperio juostos objektais (žr. **4.13**).

Asteroidų judėjimą smarkiai trikdo didžiosios planetos, ypač Jupiteris. Tačiau rasta dvi grupės asteroidų, esančių „saugioje“ vietoje. Abi grupės skrieja Jupiterio orbita, viena priekyje jo, kita už jo. Atstumas tarp Jupiterio ir šių asteroidų grupių lygus atstumui nuo Saulės iki Jupiterio, t. y. Saulė, Jupiteris ir asteroidų grupė (kuri nors) visą laiką yra lygiakraščio trikampio viršūnėse. Tai puiki 3-jų kūnų uždavinio atskiro atvejo, nagrinėto Lagranžo, iliustracija (žr. **2.14**). Didieji šių grupių asteroidai pavadinti Trojos karo did-

vyrių vardais: priekyje Jupiterio yra graikai (Achilas, Hektoras, Odisėjas ir kt.), už jo – trojėnai (Patroklas, Priamas, Enėjas ir kt.). Jupiterio traukos įtakoje asteroidų žiede atsiranda properšos.

Mažųjų planetų dydis įvertinamas teoriškai pagal jų spindesį, atstumą ir albedą. Pastarajam nustatyti reikia lyginti šviesos srautą regimojoje spektro dalyje (atspindėtą Saulės šviesą) su paties asteroido šiluminiu spinduliavimu infraraudonuosiuose spinduliuose (didesnio albedo paviršius įkaista mažiau). Didžiausia mažoji planeta yra **Cerera** – jos skersmuo maždaug 950 km. Po to eina **Paladė** (530 km), **Vesta** (530 km) ir kt. Tik 14 asteroidų skersmuo didesnis kaip 250 km. Juo mažesni asteroidai, tuo jų daugiau. Tarp žinomų asteroidų yra mažesnių kaip 1 km, bet tai tie, kurie pasirodo arti Žemės. Kilometrinių kūnų asteroidų žiede galėtų būti šimtai tūkstančių. Iš ten dabar gaudomi kelių kilometrų dydžio asteroidai (tokie yra ir asteroidai su lietuviškais vardais bei Lietuvos astronomų 2001 m. atrastas asteroidas). Asteroidai savo žiede susiduria ir dūžta. Mažyčių skeveldrų, matyt, yra be galo daug, bet jų jau negalima vadinti asteroidais. Skeveldros ir dulkės dengia ir asteroidų paviršius. Kentaurų skersmuo galėtų būti 100–300 km.

Sąveikaudami vienas su kitu, susidurdami ir duždami, asteroidai jungiasi ir sudaro **šeimas**, kurių nariai skrieja aplink Saulę panašiomis orbitomis. Tokių šeimų žinoma per 50.

Asteroido albedas, kaip ir jo atspindėtos Saulės šviesos spektras, daug pasako apie jo paviršiaus (o gal ir vidaus) cheminę sudėtį. Pagal tai asteroidai dažnai dalijami į tris tipus: **S** (*stony*), **M** (*metallic*) ir **C** (*carbon*). S tipui priklauso gana šviesūs kūnai (albedas maždaug 0,15), jie sudaryti iš silikatinės medžiagos. Asteroidai su metalų priemaiša yra truputį tamsesni (albedas apie



4.23 pav. *Mažoji planeta Ida*

0,10) ir priskiriami M tipui. Tamsiausi (albedas 0,02–0,05) C tipo asteroidai turi daug anglies junginių. Daugiausia (>50%) yra C, o mažiausiai (5%) M tipo asteroidų. Įvairūs tipai pasiskirstę nevienodai: arti Marso orbitos, t. y. vidinėje žiedo pusėje beveik visi asteroidai yra S tipo, o žiedo išorėje 80% jų yra C tipo.

Asteroidai (išskyrus pačius didžiausius) yra netaisyklingo pavidalo luistai, uolų skeveldros. Sukantis nesferiškam kūnui, turi keistis jo spindesys. Iš tikrųjų daugelio asteroidų spindesys reguliariai svyruoja 5–20 valandų periodu. Tai jų sukimosi periodas. Kai kurie asteroidai yra susijungę į dvinares sistemas ir juda aplink bendrą masių centrą.

Iki 2003 m. JAV TE „Galileo“, NEAR (*Near Earth Asteroid Rendezvous*) ir „Stardust“ iš arti stebėjo penkis 10–60 km dydžio asteroidus: **Annefrank**, **Erotą**, **Gasprą**, **Idą** ir **Matildą**. 2000 m. erdvėlaivis NEAR netgi tapo Eroto palydovu, o po to nusileido ant jo paviršiaus! Perduotuose vaizduose matyti netaisyklingos formos kūnai, kurių visi šonai nusėti šimtų ir tūkstančių apskritų duobių – smūginių kraterių (**4.23** pav.). Kelia nuostabą ypač dideli krateriai. Štai Matildoje, kurios matmenys yra 57×53×50 km, žiojėja net 30 km skersmens ir 6 km gylio krateris, be jo, dar 4 didesni nei 20 km.

Žinoma per 200 asteroidų, kurie patenka į Žemės orbitos vidų. Jų skersmenys nuo kelių metrų iki 8 km. Paskaičiuojama, kad tokių asteroidų, didesnių kaip 1 km, turėtų būti apie 1000, o didesnių už 100 m – keli šimtai tūkstančių. Aišku, tikimybė Žemei susidūrti su tokiu kūnu yra. Tai patvirtina palyginti nesenos Žemės žaizdos (žr. **4.15**). Su tobula stebėjimų įranga (ypač radiolokacijos būdu) pavyksta susekti keliolikos ar kelių metrų kūnus, lekiančius už šimtų tūkstančių kilometrų. Būtent jau užregistruoti keli tokio dydžio asteroidai, praskrieję arčiau Mėnulio. Pavojingų Žemei objektų paieška sulaukė ypatingo dėmesio.

Asteroidų žiedo kilmė neaiški. Gal tai iširusių vienos ar kelių mažų planetų skeveldros, o gal medžiaga, negalėjusi susieiti į krūvą dėl galingos kaimyninio Jupiterio traukos. Bendra asteroidų masė tesudaro apie 10% Mėnulio masės.

4.13. KOMETOS

Labai keisto pavidalo, su uodegomis, nakties dangaus šviesuliai nuo seno vadinami ***kometomis*** (gr. *kometes* (*aster*) – uodeguota (žvaigždė)). Paprasta akimi kometą galima išvysti vidutiniškai kas 10–15 metų. Tačiau apskritai kometos pasirodymas nėra retas reiškinys. Pro teleskopus kasmet atrandama net po keliolika naujų kometų.

Kometos skrieja aplink Saulę labai įvairiomis orbitomis. Daugumos orbitų ekscentricitetai yra labai dideli ($e > 0{,}5$), o dažnai net sunku pasakyti, ar kometa skrieja labai ištęsta elipse, ar parabole, ar hiperbole. Pastaraisiais atvejais kometa ties Saule pasirodo tik vieną kartą. Elipsėmis judančios kometos

aplanko Saulę periodiškai. Jeigu afelyje kometa nutolsta nuo Saulės per tūkstančius av, tai jos apskriejimo aplink Saulę periodas yra šimtai tūkstančių metų, ir ją logiška laikyti **vienkartine**. Kai periodas mažesnis kaip 200 metų, kometa laikoma **trumpaperiode**.

Kometų judėjimą labai trikdo didžiosios planetos, ypač Jupiteris ir Saturnas. Suartėjusių su šiomis planetomis kometų orbitos gali pasikeisti neatpažįstamai: kometa, pavyzdžiui, iš ilgaperiodės gali virsti trumpaperiode, ir atvirkščiai. Yra daug kometų, kurios vėl pasirodo kas 4–10 metų ir kurių orbitų afeliai yra ties Jupiterio orbita. Aišku, tai kometos, kurių orbitas pakoregavo masyvusis Jupiteris. Jos vadinamos **Jupiterio šeimos kometomis**. Taip pat yra **Saturno**, **Urano** ir **Neptūno** sukurtos **kometų šeimos**. Neptūno šeimos kometų apskriejimo periodas yra maždaug 80 metų.

Kometų orbitų plokštumų orientacija ekliptikos plokštumos atžvilgiu yra labai įvairi: posvyrio kampas gali kisti nuo 0 iki 180°, t. y. kometos gali skrieti tiek **tiesiogine** (kaip planetos), tiek **atvirkštine kryptimi**.

Tipinės kometos struktūroje matyti šviesus **branduolys**, jį supanti, į kraštus silpnėjanti **skraistė**, arba **koma**, ir iš jos nutįsęs šviesus šleifas – kometos **uodega** (**4.24** pav.). Branduolys ir skraistė sudaro kometos **galvą**. Būdingiausia kometų savybė – palyginti greitas pavidalo kitimas. Visa kometų pasirodymo ir išnykimo danguje eiga patvirtina prielaidą, kad kometos tikrasis (o ne regimasis!) branduolys yra 1–50 km dydžio luistas, sudarytas iš sušalusių dujų ir mažesnio kiekio dulkelių bei stambesnių akmeninių ir metalinių dalelių. Kol toks mažas kūnas yra labai toli nuo Saulės – jo nematyti. Artėjant prie Saulės, jau šiapus Jupiterio orbitos (5 av), šilumos paveikti branduolio ledai pradeda garuoti (**sublimacijos** procesas). Išlėkusios molekulės ir atsipalaidavusios dulkelės formuoja skraistę, kurią jau galima įžvelgti iš Žemės kaip blyškią dėmelę. Juo arčiau Saulė, tuo daugiau išsiskiria iš branduolio dujų ir dulkių – kometa



4.24 pav. *Kometa*

šviesėja. Skraistės centre išryškėja šviesi dėmelė – medžiagos sutankėjimas vadinamas kometos branduoliu (jame slypi nematomas kietasis branduolys). Šviesos slėgio ir Saulės vėjo veikiama kometos galvos medžiaga nutįsta į priešingą Saulei pusę – atsiranda uodega (gali būti ir kelios). Kometa visiškai subręsta savo orbitos perihelyje. Tada, esant palankioms aplinkybėms (arti Saulė, neišsieikvojusi kometa ir kt.), kometos galvos skersmuo išauga iki 1–2 mln. km, o uodega gali nutįsti iki 150 mln. km. Tai – maksimalūs dydžiai, bet daugelio kometų jie būna gerokai mažesni. Nors matomos kometos dalys užima labai didelį tūrį, jų masė yra visiškai maža („matomas niekas“), daug mažesnė už kieto branduolio masę, kuri vidutiniškai lygi 10^{-9} Žemės masės. Pro kometos skraistę ir uodegą lengvai prasišviečia žvaigždės. Toldama nuo Saulės (uodega į priekį), kometa silpnėja, dingsta uodega, traukiasi galva ir, kai nustoja garuoti branduolys, ji dingsta iš akiračio.

Kometų branduoliuose daugiausia turėtų būti H_2O, CO, CO_2, CH_4, NH_3 ledo. Šių junginių molekulės, vykstant sublimacijai išlėkusios į kometos galvą, paveiktos Saulės spinduliuotės, skyla (fotocheminė disociacija) į dalis, kurios paįvairina skraistės cheminę sudėtį. Be to, Saulės spinduliuotė jonizuoja dalį molekulių. Atomų, molekulių (radikalų) ir jonų rinkinio – kometos galvos – spektre matyti daugybė įvairaus intensyvumo emisijos juostų. Spektre pėdsakus palieka H, C, O (kai kometa būna labai arti Saulės, tai ir metalų) atomai, C_2, CH, CN, HCN, OH, H_2O, NH_2 ir kt. molekulės, CO^+, CH^+, CN^+, OH^+, CO_2^+, H_2O^+ ir kt. jonai. Jų švytėjimo šaltinis – Saulės energija. Kometos atomai ir molekulės sugeria Saulės spinduliuojamus kvantus, o paskui praktiškai niekieno netrukdomi (labai mažas medžiagos ir spinduliuotės tankis) juos perspinduliuoja (**rezonansinė fluorescencija**). Atominis vandenilis sudaro savotišką **kometos galvos atmosferą**, kuri yra dešimtis kartų didesnė už pačią galvą. Dulkelės, esančios kometos galvoje, atspindi ir išsklaido Saulės šviesą, todėl kometos spektre, be emisijos juostų, dar matyti silpnas ištisinis spektras, analogiškas Saulės spektrui.

Kometų uodegos pradeda rastis, kai iki Saulės lieka maždaug 2 av, kai Saulės šviesos slėgio ir Saulės vėjo įtaka kometos skraistei darosi apčiuopiama. Saulės vėjo nešamas magnetinis laukas pagauna jonizuotas molekules ir dideliu greičiu (šimtų km/s) tempia jas tolyn nuo kometos branduolio. Dėl didelio jonų greičio formuojasi plona, beveik tiesi, mažai tenukrypstanti nuo linijos Saulė–kometa tęsinio, uodega. Tokia plazminė uodega priskiriama **I tipui**. Jos spektrą sudaro emisijos juostos, priklausančios anksčiau minėtiems jonams. Šio tipo uodegos turi melsvą atspalvį.

Šviesos slėgis kometos skraistėje efektingiausiai veikia maždaug mikrometro dydžio dulkeles. Tačiau jų įgaunamas pagreitis yra mažesnis negu jonų. Todėl dulkelės kuria savą, atgal išlenktą, uodegą. Juo didesnės dulkelės, tuo mažesnis greitis ir tuo labiau užsiriečia uodega. Uodegos iš dulkelių priklau-

so **II tipui**. Šio tipo uodegos švyti išsklaidyta Saulės šviesa, vadinasi, jų spektras – ištisinis, o spalva gelsvoka. Kartais viena kometa turi visų tipų uodegas. Šviesos slėgis neutraliems atomams, neutralioms molekulėms bei stambesnėms kietosioms dalelėms neefektyvus, todėl jų kometų uodegose praktiškai nėra. Kietosios dalelės, išsilaisvinusios iš ledo pančių, pamažu pasklinda palei kometos orbitą.

Daug kartų praeityje matyta ir išgarsinta **Halio kometa** buvo pirmoji, kuriai detaliai tirti panaudoti TE. Šios kometos orbitos pagrindiniai elementai tokie: a = 17,95 av, e = 0,967, i = 162°. Orbitos perihelis yra viduje Veneros orbitos, o afelis – už Neptūno orbitos. Kometa grįžta prie Saulės kas 76 metai. Jos pasirodymą 1986 m. ir lydėjo erdvėlaivių skrydžiai. Svarbiausias jų rezultatas – pirmą sykį mokslo istorijoje gautas kietojo kometos branduolio vaizdas. Tyrimo metu jis buvo netaisyklingos formos, truputį pailgas, maždaug 15×10 km dydžio. Kaip ir tikėtasi, ledo luisto paviršius tamsus, matyt, padengtas kietų dalelių, likusių ledui ištirpus. Pro plutos angas ir plyšius branduolys išskiria daugiausia H_2O garų ir anglies dulkių. Antrąja gerai iš arti stebėta (2001 m. JAV TE) kometa tapo **Borelio kometa.**

Kometų branduolio masė per maža, kad jis galėtų prie savęs sulaikyti išgaravusias dujas ir išsilaisvinusias dulkeles. Kometos skraistė ir uodega nuolat barsto medžiagą į tarpplanetinę erdvę, ir po kiekvieno kometos pasirodymo ties Saule ji gerokai sulieseja. Ypač greitai tirpsta trumpaperiodžių kometų branduoliai. Matyti, kaip po eilinio pasirodymo jos darosi vis silpnesnės ir pagaliau visai dingsta. Dalis kometų žūva susidūrusios su Saule ar planeta. Dar kitas kometas masyviųjų planetų trauka nukreipia tolyn nuo Saulės. Vadinasi, jeigu dabar kometų yra, tai jos nepaliaujamai iš kažkur atsiranda. Trumpaperiodėmis kometomis, matyt, tampa ilgaperiodės, kai jas stipriai paveikia kuri nors didžioji planeta. O iš kur atlekia ilgaperiodės kometos? Manoma, kad maždaug 100 000 av atstumu nuo Saulės yra kometų branduolių debesis (**Orto debesis**), kuriame jų gali būti milijardai. Artimųjų žvaigždžių ar visos žvaigždžių sistemos traukos pokyčio (skriejant Saulės sistemai aplink Galaktikos centrą) paveikti kai kurie šio debesies ledkalniai pasuka į planetų sistemos centrinę dalį. Čia vėl kyla klausimas: o iš kur tas debesis, kaip jis galėjo susidaryti taip toli nuo Saulės. Tikslaus atsakymo į šį klausimą dar nėra. Kitas kometų branduolių debesis (tiksliau, žiedas) yra už 30 av nuo Saulės, t. y. už Neptūno orbitos. Tai vadinamoji **Koiperio juosta**. Pradedant 1992 m., iki 2003 m. čia jau aptikta per 400 kūnų. Aišku, randami patys didžiausi objektai. Jų dydis įvertinimas pagal regimą spindesį, nuotolį nuo Saulės ir Žemės bei pasirinktą albedą. Stebėti kūnai turėtų būti 100–1200 km dydžio. Iš viso tokio dydžio kūnų ten gali būti dešimtys tūkstančių, o mažesnių, iki 1 km, milijardai. Ko gero, ir Plutonas su Charonu priklauso šiai šeimai. Kometos, kilusios Koiperio juostoje, turi periodus, lygius maždaug 200 metų.

Kometų branduoliai, dar vadinami kometoidais, galimas daiktas, yra likučiai medžiagos, iš kurios kadaise kūrėsi planetos. Čia ir slypi pagrindinė kometų tyrimo prasmė.

Keletą kometų pirmasis atrado Lietuvos astronomas Kazimieras Černis (vieną kartu su Jovaru Petrausku). Naujos kometos pavadinamos atradėjo pavarde.

4.14. METEORAI

Trumpalaikį ***meteoro*** (gr. *meteoron* – atmosferos reiškinys), arba „krintančios žvaigždės", reiškinį sukelia mažas kosminis kūnas, labai dideliu greičiu įsirėžęs į Žemės atmosferą. Šis greitis gali būti nuo 11 iki 73 km/s priklausomai nuo kūno orbitinio greičio jo kelyje aplink Saulę didumo ir greičio krypties Žemės atžvilgiu (didesni kaip 73 km/s greičiai galimi, kai kūnas atlekia iš tarpžvaigždinės erdvės). Dėl didelio greičio atmosferoje prieš meteorinį kūną, arba ***meteoroidą*** (taip vadinamas kūnas, galįs sukelti meteorą), susidaro **smūginė banga**. Už jos oro temperatūra pakyla iki dešimčių tūkstančių kelvinų, oras jonizuojasi, pats kūnas įkaista iki 3000 K, jo paviršius lydosi ir garuoja, susidaro įkaitusių dujų debesėlis, kuris nutįsta palei meteoro lėkimo trajektoriją: už švytinčio kūno sekundę kitą matyti gęstantis pėdsakas. Meteoro spektre ant ištisinio fono žėri išgaravusių atomų ir jonų emisijos linijos. Lengvai atpažįstamos Na I, Fe I, Al I, Ca II, Mg II, Si II bei kitų atomų ir jonų linijos.

Meteoro šviesumas priklauso nuo meteorinio kūno masės ir jo greičio atmosferoje. Esant vidutiniam greičiui, plika akimi įžiūrimus meteorus sukuria dalelės, kurių masė yra 0,01 g ir didesnė (dydis – maždaug 2 mm ir daugiau). Jonizuotas meteoro pėdsakas gerai atspindi radijo bangas, todėl radiolokacijos būdu dar registruojami meteorai, kuriuos sukelia 10^{-4} g (~0,4 mm) dalelės. 1 g (~8 mm) dalelė sužadina meteorą, kuris švyti kaip šviesiausios žvaigždės. Kai į atmosferą įsirėžia kilogramo ar didesnės masės kūnas, pasirodo itin įspūdingas meteoras. Matomas greitai lekiantis ugnies kamuolys, dažnai girdėti įvairūs garsai, o ilgas dūmų pėdsakas išsilaiko keletą minučių. Tokie ryškūs (kartais matomi ir dieną) meteorai vadinami ***bolidais*** (gr. *bolis* – svaidomoji ietis). Kartais itin ryškaus bolido pasirodymas baigiasi sprogimu atmosferoje.

Bolidai pasirodo gana retai, ir apskritai juo šviesesnis meteoras, tuo rečiau jis sužimba. Iš viso per parą pasirodo apie $2 \cdot 10^8$ plika akimi įžiūrimų meteorų. Per parą meteorų pavidalu į Žemę iškrenta maždaug 15 tonų medžiagos.

Dauguma meteorų sužimba 90–120 km aukštyje (priklauso nuo greičio), o užgęsta 75–95 km aukštyje, bolidai – 40–20 km aukštyje. Stebint meteorą bent iš dviejų vietų, galima nustatyti meteorinio kūno greitį ir tikrąją trajektoriją Žemės atmosferoje, o pagal tai ir buvusią jo heliocentrinę orbitą. Paprastai meteoriniai kūnai skrieja elipsėmis, parabolinės orbitos pasitaiko ypač retai.

Tam tikromis dienomis meteorų pagausėja, ir daugelio jų regimųjų trajektorijų tęsiniai atgal susieina į mažą dangaus plotelį. Aišku, tai yra perspektyvos padarinys, nurodantis, kad už atmosferos tokie meteoriniai kūnai skriejo maždaug lygiagrečiomis orbitomis, vadinasi, įėjo į kažkokį giminingos kilmės dalelių srautą. Iš tokio srauto kilę meteorai sudaro vadinamąjį ***meteorų srautą***. Dangaus sferos taškas, arti kurio susikerta tokių meteorų regimųjų takų tęsiniai, vadinamas meteorų srauto ***radiantu*** (lot. *radians* – spinduliuojantis). Radiantas rodo kryptį, iš kurios atlekia meteorinių dalelių pluoštas. Meteorų srautai vadinami pagal žvaigždyno, kuriame yra jų radiantas, lotynišką pavadinimą, pvz., Andromedidai (radiantas Andromedos žvaigždyne), Geminidai (radiantas Dvynių (*Gemini*) žvaigždyne) ir pan. Meteorų srautas iš tam tikro radianto paprastai pasirodo kasmet tomis pačiomis dienomis, t. y. toje pačioje Žemės orbitos vietoje. Vadinasi, ten Žemės orbita kerta meteorinių dalelių srautą, kuris yra išsibarstęs per visą savo orbitą. Jeigu įvairiose orbitos vietose dalelių srauto tankis yra nevienodas, tai matomo meteorų srauto intensyvumas įvairiais metais būna taip pat nevienodas. Kartais Žemė susiduria su ypač didelio tankio dalelių pluoštu – tiesiog dalelių spiečiumi. Tada Žemėje matyti labai įdomus reiškinys – **meteorų lietus**, arba „žvaigždžių lietus“, kai per vieną valandą sužimba tūkstančiai meteorų.

Dabar žinoma kelios dešimtys meteorų srautų. Radiolokacijos metodu aptinkami ir tie srautai, kurių radiantai yra Saulės apšviestoje dangaus pusėje. Daugelį meteorų srautų sukelia dalelės, kurių orbitos sutampa su jau iširusių ar dar egzistuojančių kometų orbitomis. Tai rodo, kad yra glaudus ryšys tarp meteorų srautų ir kometų ir kad iš tikrųjų kometų branduoliuose yra kietų dalelių, kurios, išgaravus ledams, per daugelį metų dėl įvairių priežasčių pasklinda po visą kometos orbitą. Meteorų srauto aktyvumas dažniausiai trunka keletą dienų, taigi orbitinio dalelių žiedo storis siekia milijonus kilometrų. Ilgainiui dėl įvairių trikdymų dalelių žiedas vis labiau storėja, retėja ir pagaliau ištirpsta bendrame tarpplanetinės medžiagos fone (žr. **4.16**). Dauguma meteorų nepriklauso žinomiems meteorų srautams. Tokie meteorai vadinami **sporadiniais**, arba **atsitiktiniais**.

Lekiantis atmosferoje meteorinis kūnas mažėja – išsilydęs jo paviršius garuoja ir yra nuo stipraus oro pasipriešinimo. Maži meteoriniai kūneliai atmosferoje sudega ir tiesiogiai Žemės paviršiaus nepasiekia. Tiktai po bolido pasirodymo galima laukti kūno arba jo skeveldrų kritimo. Mat didesnis kūnas jau gali nespėti išnykti iki tol, kol jis praranda kosminį greitį kažkur 30–10 km aukštyje. Po to meteorinio kūno likutis krinta kaip įprastas kūnas. Dažnai tankiuose atmosferos sluoksniuose meteorinis kūnas skeldėja, ir tada jo gabaliukai pabyra didelėje teritorijoje. Stambūs (tūkstančių tonų) meteoriniai kūnai trenkiasi į Žemę dar nepraradę kosminio greičio.

Patekusios į atmosferą, mikrometrinės kosminės dalelės sąveikauja tiktai su atskiromis oro molekulėmis ir kokių nors registruojamų efektų nesukelia.

Jos greitį praranda dar dideliame aukštyje, o po to vingiuota trajektorija labai lėtai leidžiasi žemyn. Nusėdusias ant Žemės dulkeles galima rasti ir tirti, pavyzdžiui, ištirpinus švarų Antarktidos sniegą. Manoma, jog per parą ant Žemės dulkelių pavidalu nusėda maždaug 150 tonų medžiagos, t. y. daug daugiau, negu jos atneša stambesnės dalelės, sukeliančios meteoro reiškinį.

4.15. METEORITAI

Nespėję suirti Žemės atmosferoje ir „iš dangaus" nukritę kūnai vadinami ***meteoritais***, o nusėdusios ant Žemės kosminės dulkelės – ***mikrometeoritais***. Meteoritai surandami arba atsitiktinai (daugiausia stambūs), arba specialiai ieškant bolido kritimo vietoje. Surasti meteoritai pavadinami vietovės, kurioje jie nukrito, vardu.

Meteoritai – tai vieninteliai kosminiai kūnai (išskyrus uolienas, pargabentas iš Mėnulio), kuriuos galima visapusiškai tirti Žemės laboratorijose. Atitinkamai sukaupta daug žinių apie jų fizikines ir chemines savybes, evoliuciją, amžių. Pagal cheminę sudėtį meteoritai būna trijų pagrindinių klasių: **geležiniai**, arba **sideritai** (gr. *sideros* – geležis), **akmeniniai**, arba **aerolitai** (gr. *aer* – oras + gr. *lithos* – akmuo) ir **geležiniai akmeniniai**, arba **siderolitai**. Geležinius meteoritus sudaro sudėtingos, Žemės sąlygomis nepasiekiamos kristalinės struktūros geležies ir nikelio (6–30%) lydinys su labai maža kitų elementų priemaiša. Akmeninių meteoritų vidutinė cheminė sudėtis tokia: deguonies 45%, silicio 22%, geležies 17%, magnio 14% ir 2% kitų elementų. Pagal deguonies ir silicio santykinį kiekį šie meteoritai panašūs į Žemės plutos uolienas, bet už jas turtingesni geležies, magnio ir nikelio. Akmeninių intarpų pasitaiko kai kuriuose geležiniuose meteorituose ir ypač daug jų siderolituose. Pastaruosiuose daugiausia geležies (~55%), po to eina deguonis, magnis, silicis, nikelis ir kt.

Minėtos trys klasės dar nenusako visos meteoritų cheminės sudėties ir struktūros įvairovės – jie skirstomi dar į smulkesnes grupes ir tipus. Štai daugumos (~86%) akmeninių meteoritų viduje yra įsiterpę silikatiniai (ta pati medžiaga kaip pagrindinio kūno) 1–2 mm dydžio sferiniai grūdeliai, vadinami **chondromis** (gr. *chondros* – grūdelis). Aerolitai su chondromis vadinami ***chondritais***, o be jų – ***achondritais***. Yra tokių chondritų, kuriuose gausu anglies junginių, tarp jų organinių. Tai – **anglingieji chondritai**. Įdomu, kad jų procentinė cheminė sudėtis artima Saulės fotosferos sudėčiai (išskyrus vandenilį ir inertines dujas). Žemės uolienose chondrų nėra.

Cheminės sudėties ir struktūros ypatumai rodo, jog kadaise meteoritai buvo didelių kūnų sudėtyje, kur viešpatavo labai didelis slėgis, aukštoka temperatūra ir vyko elementų diferianciacija bei lėtas aušimas. Tokie kūnai gali būti asteroidai. Šią prielaidą palaiko orbitų, kuriomis skriejo meteoritai iki susidūrimo su Žeme, padėtis – visų jų afeliai yra asteroidų žiede (orbitos

nustatomos pagal bolidų trajektoriją). Meteoriniai kūnai, kilę iš suirusių kometų, matyt, yra purūs (tankis apie 1000 kg/m^3) ir todėl visiškai sudega atmosferoje. Geležinių meteoritų tankis ~7700 kg/m^3, geležinių akmeninių – ~5000 kg/m^3 ir akmeninių – ~3500 kg/m^3.

Įvairiapusiai tyrimai, reikia manyti, atskleidė meteoritų kilmės paslaptį. Susidarant didžiosioms planetoms (žr. **4.17**), asteroidų žiede formavosi mažesni, šimto ar kelių šimtų ilometrų skersmens kūnai. Energija, išsiskirianti radioaktyvųjų elementų skilimo procese, kaitino šiuos kūnus, ir jie lydėsi. Prasidėjo medžiagos sluoksniavimasis: didesnio tankio medžiaga (geležis, nikelis) grimzdo kūno centro link, o mažiau tanki (silikatai) kaupėsi aukštesniuose sluoksniuose ir ties paviršiumi. Sumažėjus energijos išsiskyrimui, kūnai pradėjo aušti, greitai paviršių padengė sukietėjusi pluta, tačiau giliai esantis metalinis branduolys vėso labai lėtai – daugelį milijonų metų. Tokių kūnų atsirado daug, jie trynėsi ir daužėsi, nuo smūgių skeldėjo ir trupėjo (tai tebevyksta ir dabar). Kai kurių skeveldrų orbitos pasiekė Žemės orbitą, ir pasidarė neišvengiami jų ir Žemės susidūrymai. Nukritusio meteorito savybės priklauso nuo to, kur jis susiformavo – jei kūno centre – bus geležinis, jei išorėje – akmeninis (silikatinis), jei tarpinėje zonoje – geležinis akmeninis. Tokią meteoritų kilmę patvirtina sąsaja tarp jų ir asteroidų sudėčių (žr. **4.12**): S tipo asteroidus atitinka aerolitai, M tipo – sideritai ir C tipo – anglingieji chondritai.

Meteorituose ir dabar randama šiek tiek radioaktyviųjų elementų ir jų irimo produktų. Pagal tai, kaip žinoma, galima nustatyti meteorito amžių, arba tiksliau – laikotarpį, praėjusį nuo tam tikrų etapinių meteorito evoliucijos momentų. Antai nustatomas laikas, praėjęs nuo meteoro motininio kūno atvėsimo momento, nes nuo tada juose pradeda kauptis (neišsilaksto) inertinės dujos – radioaktyvaus skilimo produktai. Dauguma meteoritų atvėso prieš 3,5–4,6 milijardų metų. Kitas svarbus etapas meteorito istorijoje – jo savarankiško egzistavimo pradžia subyrėjus motininiam kūnui. Išsilaisvinusią skeveldrą pradeda tiesiogiai bombarduoti kosminiai spinduliai, paviršiuje vyksta branduolinės reakcijos ir kaupiasi jų produktai. Šių produktų kiekis ir parodo meteorito, kaip atskiro kūno, amžių: jis būna nuo kelių milijonų iki šimtų milijonų metų.

Dažniausiai krinta akmeniniai meteoritai. Bendrame kritimų skaičiuje akmeniniai meteoritai sudaro 93%, geležiniai – 5% ir geležiniai akmeniniai – 2%. Tačiau pasaulio gamtos muziejuose daugiau yra geležinių meteoritų. Taip yra todėl, kad šios klasės meteoritai lengvai krinta į akis. O akmeniniai meteoritai per gana trumpą laiką praranda sąveikos su atmosfera (lydymosi) požymius ir tampa panašūs į paprastus lauko akmenis. Iš viso pasaulyje surinkta apie 3000 meteoritų. Didžiausieji sveria dešimtis tonų, o mažiausieji – gramus. Geležinis meteoritas – visų meteoritų rekordininkas tūno Namibijoje netoli Hobabio miesto: jo masė 60 tonų. Galima manyti, kad kažkur žemėje ar vandenyse yra pasislėpusių kur kas didesnių meteoritų.



4.25 pav. *Arizonos krateris*

Lietuvoje užfiksuoti 4 meteoritų kritimai: 1877 m. netoli Juodžių (Panevėžio raj.), 1908 m. Akmenės apylinkėse, 1929 m. arti Andrioniškio (Anykščių raj.) ir 1933 m. prie Žemaitkiemio (Ukmergės raj.). Trimis atvejais, išskyrus 1908 m. meteoritą, krito ne vientisas kūnas, bet jo skeveldros. Pavyzdžiui, Žemaitkiemio meteorito kritimo vietoje rasta daugiau kaip dvidešimt gabalų, kurių bendra masė apie 42 kg.

Kai masyvus meteorinis kūnas trenkiasi į Žemę greičiu, didesniu kaip 3–4 km/s, kritimo vietoje įvyksta sprogimas. Didelė kūno kinetinė energija virsta šilumine ir deformacijos energija, temperatūra pakyla iki kelių tūkstančių laipsnių. Kritęs kūnas staiga išgaruoja, o atsiradusių dujų slėgis pasiekia maždaug 10^{11} Pa. Besiplėsdamos šios dujos sukelia sprogimą. Žemėje atsiranda duobė – ***krateris***, arba ***astroblema*** (gr. *astron* – žvaigždė + gr. *blema* – žaizda). Žemėje kraterius ardo vėjas, krituliai, gyvoji gamta, geologiniai procesai, ir jie pasidaro sunkiai atpažįstami. Kraterių, kurių skersmuo nuo šimtų metrų iki šimto kilometrų, Žemėje žinoma apie 120. Daugumos jų amžius mažesnis kaip 200 mln. metų. Geras dar neseno meteoritinio kraterio pavyzdys – krateris Arizonos (JAV) dykvietėje (**4.25** pav.). Jo skersmuo 1200 m., gylis 190 m., juosiančio žiedinio pylimo aukštis 40–50 m. Apskaičiuojama, kad šią maždaug prieš 50 000 metų įvykusią katastrofą sukėlė 60 m skersmens ir milijono tonų masės geležinis meteorinis kūnas, atsitrenkęs į Žemę 15 km/s greičiu. Didžiausia žiedinė struktūra rasta ties Jukatano pusiasalio krantu (Meksika). Šio darinio, vadinamo Čiksulubo krateriu, skersmuo maždaug 300 km. Tokią žaizdą Žemėje galėjo padaryti maždaug 10 km skersmens asteroidas. Manoma, jog šios katastrofos pasekmė – dinozaurų išnykimas, įvykęs prieš 65 mln. metų. Lietuvoje atrastos 5 km skersmens Mizarų (Lazdijų raj.) ir 8 km skersmens Veprių (Ukmergės raj.) astroblemos. Jas aptiko geologai po storu nuogulų sluoksniu.

4.16. TARPPLANETINĖ MEDŽIAGA IR LAUKAI

Dažnas meteorų pasirodymas, mikrometeoritai Žemės paviršiuje leidžia teigti, kad erdvėje tarp planetų yra daug smulkių kietų dalelių ir mikroskopinių dulkelių. Tiesioginius jų smūgius patiria ir registruoja erdvėlaiviai. Be to, yra dar vienas akivaizdus tarpplanetinių dulkių egzistavimo įrodymas. Tai – ***Zodiako šviesa***. Taip vadinamas blausus švytėjimas, regimas Zodiako žvaigždynuose palei ekliptiką. Švytinti juosta yra plačiausia ir ryškiausia arti Saulės, todėl Zodiako šviesa geriausiai matoma vakaruose Saulei nusileidus arba rytuose prieš aušrą. Ne visi vakarai ar rytai tam tinka. Reikia, kad tuo metu ekliptika sudarytų didžiausią kampą su horizontu, o tai būna pavasario vakarais ir rudens rytais. Be vargo Zodiako šviesa matoma atogrąžų juostoje, nes ten ekliptika visada kyla virš horizonto statesniu kampu ir, be to, ten greičiau sutemsta ir greičiau išaušta. Zodiako šviesos kūgis, tolstant nuo Saulės, pereina į vos vos regimą švytėjimą, kuris vėl sustiprėja 180° atstumu nuo Saulės. Čia esanti šiek tiek suplota palei ekliptiką maždaug 10° dydžio šviesi dėmė vadinama ***atošvaiste***.

Zodiako šviesos spektras tapatus Saulės spektrui, vadinasi, švytėjimą sukelia Saulės šviesą sklaidančios tarpplanetinės mikroskopinės dulkelės. Jos kaupiasi ties ekliptikos plokštuma ir sudaro labai didelį lęšišką debesį. Vidutinis tarpplanetinių dulkių medžiagos tankis 10^{-19}–10^{-20} kg/m^3. Aišku, toks dulkelių kiekis netrukdo planetoms skrieti. Bendra dulkelių masė turėtų būti 10^{16}–10^{17} kg. Už 3 av nuo Saulės dulkelių labai reta.

Panašu, kad atošvaistę sukeliančios dulkelės skiriasi nuo dulkelių kitose vietose. Jos turi gerai sklaidyti šviesą atgal – tai galėtų būti dielektrinės (pvz., ledo) dulkelės. Kitur, matyt, yra dielektrinių ir metalinių dulkelių mišinys.

Tarpplanetines dulkeles veikia šviesos slėgis. Dėl to dalelės, mažesnės kaip 1 μm, apleidžia Saulės sistemą. Didesnių dulkelių šviesos slėgis nepajėgia išstumti, tačiau jo įtakoje mažėja dulkelės skriejimo aplink Saulę greitis (**Pointingo ir Robertsono efektas**). Mat dėl šviesos aberacijos reiškinio (žr. **2.10**) šviesos slėgio jėgos kryptis ne visai sutampa su linija, jungiančia Saulę ir dulkelę, t. y. atsiranda jėgos dedamoji, priešinga dulkelės greičio krypčiai. Stabdoma dulkelė pamažu spirale artėja prie Saulės ir nukrinta ant jos. Greičiau nukrinta mažesnės ir retesnės dulkelės. Geležinė 20 μm dydžio dalelė kelią nuo Žemės orbitos iki Saulės nueina maždaug per 50 000 metų. Aišku, tarp planetų turi rastis naujų dulkelių, nes priešingu atveju jų ten dėl minėtų priežasčių visai būtų nelikę. Dulkelių debesį nuolat papildo irstančios kometos ir sudužę asteroidai.

Tarpplanetinėje erdvėje taip pat yra pasklidusių dujų. Visų pirma – tai ***Saulės vėjas***, susidedantis daugiausia iš protonų ir elektronų. Ties Žemės orbita Saulės vėjo greitis 300–800 km/s, vidutinė koncentracija – 5 protonai (ir

elektronai) cm^{-3}. Tolstant nuo Saulės, koncentracija mažėja proporcingai atstumo kvadratui. Saulės vėjas sąveikauja su tarpžvaigždinėmis dujomis bei tarpžvaigždiniu magnetiniu lauku ir yra „sustabdomas“. Erdvė, kurioje dalelės Saulės atžvilgiu juda dar viršgarsiniu greičiu, vadinama ***heliosfera***. Ši turi būti nesferiška, nes pati Saulė 20–25 km/s greičiu lekia tarpžvaigždinių dujų atžvilgiu. Saulės judėjimo linkme heliosferos riba turėtų būti už 50–300 av.

Saulės vėjas stipriai veikia jonizuotą tarpžvaigždinių dujų dalį, tačiau neutralios dujos netrukdomai užpildo Saulės sistemos sritis, esančias toliau kaip 5 av nuo Saulės. Čia jos pasiskirsčiusios taip, kaip ir Saulės aplinkos tarpžvaigždinėje erdvėje, būtent vienam cm^3 tenka vidutiniškai 0,06 vandenilio atomo ir 0,012 helio atomo. Arti Saulės (<5 av) neutralių dujų pasiskirstymą ir būvį sąlygoja Saulės trauka, jos ultravioletiniai spinduliai ir Saulės vėjas.

Saulės vėjas – tai nuolatinis plazmos tekėjimas. Plazmos srautas kartu su savimi „tempia“ aktyvių Saulės sričių magnetinio lauko jėgų linijas – atsiranda **tarpplanetinis magnetinis laukas**. Šio lauko jėgų linijos arti Saulės pusiaujo plokštumos yra jai lygiagretės. Dėl Saulės sukimosi apie ašį jėgų linijos išlinksta ir įgyja spiralės pavidalą. Ekliptikos plokštumoje tarpplanetinis magnetinis laukas yra sektorinės struktūros, atspindinčios aktyvių Saulės vietų magnetinio lauko struktūrą. Dažniausiai būna 2 ar 4 sektoriai. Jie sukasi kartu su Saule ir išsilaiko per keletą jos apsisukimų. Vienuose sektoriuose magnetinio lauko linijos eina nuo Saulės, kituose – į Saulę, kaimyniniuose sektoriuose lauko kryptis priešinga. Toliau nuo Saulės pusiaujo plokštumos sektorinė struktūra dingsta, o magnetinio lauko kryptį nusako lauko kryptis Saulės fotosferoje. Magnetinio lauko indukcija ties Žemės orbita vidutiniškai lygi $5 \cdot 10^{-9}$ teslų (lauko stipris $4 \cdot 10^{-3}$ A/m). Tolstant nuo Saulės, laukas silpnėja beveik proporcingai atstumui. Aptinkamos gana didelės tarpplanetinio magnetinio lauko fliuktuacijos, priklausančios nuo Saulės aktyvumo.

Saulės sistemą skrodžia labai didelės energijos elektringosios dalelės – **kosminiai spinduliai** (žr. **6.7**). Galaktinius kosminius spindulius sklaido tarpplanetinio magnetinio lauko nevienalytiškumai, ir todėl jų intensyvumas vidinėse Saulės sistemos dalyse priklauso nuo Saulės aktyvumo. Ypač sklaidomos dalelės, kurių energija yra 10^7–10^8 eV.

Erdvėje tarp planetų yra dar gravitacinių laukų, įvairiuose šaltiniuose atsiradusių elektromagnetinių bangų ir neutrinų.

4.17. SAULĖS SISTEMOS KILMĖ IR RAIDA

Pačios Saulės kilmės ir raidos problema neatskiriama nuo žvaigždžių atsiradimo ir evoliucijos problemų nagrinėjimo apskritai (žr. **5.15**). Kai kalbama apie Saulės sistemos kilmę, paprastai turima galvoje planetų ir kitų mažesnių kūnų atsiradimas. Planetų kilmę ir raidą išaiškinti, kad ir kaip keista,

daug sunkiau negu žvaigždžių raidą. Pastarųjų yra labai daug ir įvairiose evoliucijos stadijose, todėl jas galima sudėlioti į seką pagal amžių ir šitaip pamatyti žvaigždės gyvavimą nuo jos atsiradimo iki žūties. O tiriamoji planetų sistema tėra viena (apie atrastas kitų žvaigždžių planetų sistemas dar per maža duomenų) ir nėra su kuo lyginti. Lyginti galima tik vienos sistemos ir vienodo amžiaus planetas. Todėl labai svarbu ieškoti ir rasti planetose tolimos praeities pėdsakų.

Saulės sistemos kilmei paaiškinti buvo pasiūlyta daug hipotezių. Tarp senųjų dažniausiai minimos įžymiojo lietuvių kilmės filosofo Karaliaučiaus universiteto dėstytojo (vėliau profesoriaus, rektoriaus) Imanuelio Kanto (*I. Kant*) ir prancūzų mokslininko Pjero Laplaso (*P. S. Laplace*) hipotezės. I. Kantas savo hipotezę paskelbė 1755 m. Pasak jos, Saulė ir planetos susidarė iš pirmykštės padrikos medžiagos veikiant gravitacijos ir stūmos jėgoms. Gravitacija spaudė medžiagą į gniužulus (Saulę ir planetas), o stūmos jėgos (pagal I. Kantą) neleido jai tiesiai kristi, bet vertė judėti ratu. Labiau išgarsėjo P. Laplaso hipotezė, suformuluota 1796 m. Pasak P. Laplaso, Saulė ir planetos susiformavo iš didelio ir karšto lėtai besisukančio dujų ūko. Dėl gravitacijos ūkas traukėsi, didėjo jo sukimosi greitis (judesio kiekio momento tvermės dėsnis). Dėl sukimosi ūkas darėsi vis labiau panašus į lęšį. Dar labiau padidėjus greičiui, kai ūko pakraštyje išcentrinė jėga peraugo gravitacijos jėgą, pradėjo atsiskirti plokšti dujų žiedai. Iš žiedų susidarė planetos ir jų palydovai, o iš centrinio dujų telkinio – Saulė. P. Laplaso hipotezė nepaaiškino lėto Saulės sukimosi, taip pat kėlė abejones karštų dujų kondensacija. 1919 m. anglų mokslininkas Džeimsas Džinsas (*J. H. Jeans*) paskelbė visiškai kito tipo Saulės sistemos kilmės hipotezę. Kadaise arti Saulės pralėkė kita žvaigždė, ir jos galinga trauka atplėšė dalį Saulės medžiagos. Iš jos vėliau ir išsirutuliojo Saulės palydovai. Dž. Džinso ir kitos panašios hipotezės sulaukė labai rimtos kritikos, ir dauguma astronomų jas atmetė. Arčiau tikrovės atrodė esančios I. Kanto ir P. Laplaso idėjos, pasak jų, Saulė ir planetos radosi kartu vykstant tam pačiam procesui. Šią nuostatą labai palaiko nuostabūs XX a. pabaigos planetų ir jų palydovų tyrimai iš TE.

Bet kuri Saulės sistemos kilmės teorija turi paaiškinti tokius pagrindinius sistemos sandaros ypatumus: visos planetos skrieja viena kryptimi beveik apskritiminėmis orbitomis, kurių (išskyrus Plutono) plokštumos beveik sutampa; Saulė sukasi apie savo ašį ta pačia kryptimi kaip skrieja planetos, o jos pusiaujo plokštuma artima planetų orbitų plokštumoms; planetų, išskyrus Venerą, Uraną ir Plutoną, sukimosi kryptis sutampa su skriejimo aplink Saulę kryptimi; tarp Marso ir Jupiterio orbitų yra asteroidų žiedas; daugumai planetų tinka Ticijaus ir Bodės atstumų taisyklė (žr. **4.12**); 98% visos Saulės sistemos judesio kiekio momento tenka planetoms ir tik 2% Saulei, nors joje yra 99,87% sistemos masės; pagal fizikines savybes planetos gali būti suskirstytos į Žemės grupės planetas ir planetas milžines; daugumos palydovų

orbitos yra planetų pusiaujo plokštumoje, o jų skriejimo kryptis sutampa su planetos sukimosi kryptimi (išimtys – retos).

Pagal šiuolaikines Saulės šeimos atsiradimo teorijas tiek Saulė, tiek planetos su savo palydovais atsirado iš vieno ir to paties lėtai besisukančio tarpžvaigždinio dujų ir dulkių debesies. Dėl gravitacijos traukiantis debesiui ir greitėjant sukimuisi, jis plokštėjo kryptimi, statmena sukimosi ašiai. Susiformavo maždaug 1 av storio ir 80 av skersmens dujų ir dulkių diskas su aiškiu sutankėjimu centre, kuriame susispietė per 90% debesies masės. Debesies centre rutuliojosi Saulė, o iš aplinkinio disko medžiagos radosi planetos. Šitai gerai paaiškina planetų sistemos didelį paplokštumą ir Saulės sukimosi bei planetų skriejimo aplink ją vienodą kryptį. Tačiau taip gimusi Saulė turėtų suktis daug greičiau, negu dabar sukasi. Vadinasi, kažkada Saulė neteko didelės dalies judesio kiekio momento ir perdavė ją planetų medžiagai. Kaip tai atsitiko, dar nėra vieningos nuomonės. Dažniausiai tai bandoma aiškinti greitai besisukančios prosaulės magnetinio lauko sąveika su jonizuotomis (dėl įkaitimo) vidinės proplanetinio disko dalies dujomis.

Galėjo būti taip: susislegiančiame proplanetiniame ūke kondensavosi kietos dalelės; arčiau prosaulės, kur temperatūra buvo aukštesnė, galėjo kondensuotis metalų oksidų bei silikatų dalelės, o toliau, kur temperatūra darėsi žemesnė kaip 273 K, turėjo atsirasti dar ir vandens, amoniako bei metano ledo gabalėlių. Turbulentinis medžiagos judėjimas, lydintis ūko traukimąsi, skatino dalelių susidūrimus. Susidūrusios dalelės lipo viena prie kitos ir didėjo. Milimetrų ar centimetrų dydžio gabalėliai greitai leidosi prie proplanetinio disko simetrijos plokštumos ir čia formavo ploną kietos medžiagos dalelių sluoksnį. Atsitiktiniai dalelių sutankėjimai tapo gravitacijos centrais, į kuriuos telkėsi aplinkinės dalelės. Gravitacijos jėgų spaudžiami tokie dulkių debesys ilgainiui virto nuo kelių iki kelių šimtų kilometrų dydžio kompaktiškais kūnais, pavadintais ***planetesimalėmis*** (angl. *planetesimal* < *planet* – planeta + (*infinit*) *esimal* – nykstamas dydis). Pastarųjų susidarymas užtruko mažiau kaip 10^6 metų, o jų sudėtis priklausė nuo atsiradimo vietos, t. y. nuo atstumo iki prosaulės.

Planetesimalės trikdė viena kitos orbitas, jos daužėsi, jungėsi į spiečius ir virto stambesniais dariniais, o šie, pasiglemždami aplinkinę medžiagą, dar masyvesniais kūnais ir t. t. Taip pamažu augo didesni kūnai mažesnių kūnų sąskaita. Pagaliau kai kurie išaugo iki šiuolaikinių planetų matmenų ir, jiems atsidūrus stabiliose orbitose, augimo procesas nutrūko. Žemės grupės planetoms susikondensuoti iš planetesimalių prireikė maždaug 10^8 metų. Reikia pasakyti, jog Žemės grupės planetų kilmės teorijos paaiškina planetų atstumus, mases bei sukimosi ypatumus. Daugiau abejonių kelia planetų milžinių atsiradimo klausimai. Šiuo atveju rutuliojasi dvi nuomonės. Pagal vieną jų planetos milžinės pradžioje augo taip, kaip Žemės grupės planetos, t. y. vykstant planetesimalių jungimosi procesui. Vėliau, kai jų masė pasidarė lygi 2–3 Žemės

masėms, prasidėjo dujų iš proplanetinio debesies akrecija, kurios metu susiformavo masyvūs šių planetų apvalkalai, sudaryti daugiausia iš vandenilio ir helio. Tačiau daugelio specialistų nuomone, planetos milžinės radosi kitaip. Pagal juos šios planetos formavosi iš didelių gniužulų, į kuriuos susitelkė koncentrinių žiedų, atsiradusių proplanetinio ūko išorėje, medžiaga. Taigi susidarant planetoms milžinėms, turėjo vykti procesai, labai panašūs į tuos procesus, kurie lydėjo pačios Saulės sistemos atsiradimą, būtent apie centrinį telkinį – planetos užuomazgą turėjo darytis dujų ir dulkių diskas, o iš jo – planetų palydovai. Jupiterio palydovų cheminės sudėties skirtumai (žr. **4.7**) rodo, kad jauna planeta buvo karšta ir palydovai su dideliu ledo kiekiu galėjo formuotis tik toli nuo jos.

Mėnulis, galėjo susidaryti iš mažų kūnelių, skriejusių aplink besiformuojančią Žemę. Galbūt pradžioje padrika medžiaga subėgo į kelis stambius palydovus ir tik vėliau, evoliucionuojant orbitoms, jie susijungė į vieną kūną – Mėnulį (žr. **4.3**).

Ne visa protoplanetinio debesies medžiaga pateko į planetas. Daug dujų, dulkių ir įvairaus dydžio planetesimalių liko skrieti aplink baigiančią trauktis Saulę. Nuo smulkmės tarpplanetinę erdvę išvalė stiprus jaunos Saulės vėjas ir jos šviesos slėgis (žr. **4.16**). O vienišoms planetesimalėms likimas buvo nevienodas. Daugelis jų žuvo susidūrusios su planetomis ar jų palydovais (tų smūgių randai – krateriai – ir šiandieną matyti kieto paviršiaus kūnuose), daug jų, paveiktų planetų (ypač Jupiterio) traukos, iš viso apleido Saulės sistemą, kitos daužėsi tarpusavyje ir trupėjo į mažus gabalėlius. Nedaugelį planetesimalių planetos pavertė savo palydovais. Per šimtus milijonų metų planetesimalių sparčiai mažėjo, aprimo planetų ir jų palydovų bombardavimas. Tačiau tai nereiškia, kad jų visai neliko. Štai asteroidų žiedas tarp Marso ir Jupiterio orbitų. Reikia manyti, jog asteroidai yra planetesimalių likučiai, kuriems susibėgti į vieną kūną trukdė greitai išaugusio projupiterio galinga trauka. Asteroidai formavosi vidinėse proplanetinio debesies srityse, todėl yra akmeniniai ar metaliniai. Planetesimalės, kilusios planetų milžinių valdose, turėjo turėti daug ledo. Šių kūnų orbitas smarkiai trikdė planetų milžinių traukos jėgos, ir jos atsidūrė toli nuo Saulės vadinamuosiuose Oorto ir Koiperio debesyse (žr. **4.13**). Kai tokia purvino ledo planetesimalė priartėja prie Saulės, matome ją kometos pavidalu.

Apie Saulės sistemos tolimą praeitį daug pasako meteoritų tyrimai Žemės laboratorijose (žr. **4.15**), nes tai yra skeveldros kūnų, nuo kurių prasidėjo Saulės sistemos egzistencija. Seniausių meteoritų amžius – maždaug 4,6 milijardo metų – praktiškai tai ir visos Saulės sistemos amžius. Palyginti su praėjusiu laiku planetų formavimosi laikotarpis yra trumpas.

Per milijardus metų planetos milžinės, matyt, mažai keitėsi, jų šiandieninis būvis panašus į buvusį jų jaunystės metais. Kitaip gyvavo Žemės grupės planetos. Visą laiką keitėsi jų vidus, paviršius ir atmosfera. Aktyvumu išsiskyrė mūsų Žemė, kurios gelmės ir dabar neramios.

Baigiantis formuotis Žemei, ji jau buvo gana karšta. Paviršius šilo nuo planetesimalių smūgių, dėl radioaktyviųjų medžiagų skilimo kaito planetos gelmės. Kai jos įkaito iki medžiagų lydymosi temperatūros, prasidėjo **gravitacinė medžiagos diferenciacija** – sunkūs elementai (geležis, nikelis) ir jų junginiai grimzdo gilyn, o lengvesnės medžiagos (silikatai) kilo į viršų. Paviršius greitai vėso, tvėrėsi kieta pluta. Tačiau energija, plūstanti iš vidaus, planetesimalių smūgiai nuolat keitė Žemės paviršiaus veidą. Žemėje nerasta uolienų, kurių amžius būtų didesnis kaip 3,8 milijardo metų. Iš įkaitusio Žemės rutulio skyrėsi dujos ir vandens garai – kaupėsi ir keitėsi atmosfera. Vandens garai kondensavosi, ir paviršiaus įdubose rinkosi vanduo. Susidarė sąlygos gyvybei atsirasti.

Saulės sistemos kilmės ir raidos teorijose dar yra labai daug neaiškių vietų, tačiau pagrindinės idėjos kelia vis mažiau abejonių. Jeigu Saulė ir planetos atsirado iš to paties tarpžvaigždinių dujų ir dulkių debesies, tai galima teigti, jog planetų susidarymas yra dėsningas procesas, lydintis žvaigždžių formavimąsi iš ūko. Iš tikrųjų stebėjimai rodo, kad daugelį jaunų žvaigždžių supa diskai, panašūs į tą, kurį, kaip manoma, kadaise turėjo jauna Saulė. Pagaliau prie kai kurių žvaigždžių pavyksta aptikti jau susiformavusias planetas (žr. **5.35**). Taigi ateityje, matyt, atsiras galimybė lyginti planetų sistemas, esančias įvairiose evoliucijos stadijose.

5
SKYRIUS

ŽVAIGŽDĖS IR SAULĖ

Vytautas Straižys

5.1. BENDROS ŽINIOS APIE ŽVAIGŽDES*

Žvaigždė yra didelės masės (10^{29}–10^{32} kg) ir skersmens ($3{\cdot}10^5$–$1{\cdot}10^9$ km) įkaitusios plazmos rutulys, sudarytas daugiausia iš vandenilio ir helio su nedidele sunkesnių cheminių elementų priemaiša ir skleidžiantis elektromagnetinius spindulius, elektringąsias daleles, neutrinus ir gravitacinį lauką. Žvaigždė įkaista vykstant ties jos centru ir aplink jį termobranduolinėms reakcijoms tarp vandenilio, helio, anglies, azoto, deguonies ir kitų cheminių elementų atomų branduolių, taip pat dėl gravitacinės energijos traukiantis žvaigždei. Ties centru temperatūra būna nuo 1 mln. (orionidės) iki šimtų mln. kelvinų (raudonosios milžinės ir supermilžinės). Didesniąją savo egzistavimo trukmės dalį žvaigždės dujos yra ***termodinaminėje pusiausvyroje***, t. y. jos paviršiaus išspinduliuojamas energijos kiekis maždaug lygus gelmėse pagaminamam energijos kiekiui. Žvaigždė taip pat yra ***hidrostatinėje pusiausvyroje***, t. y. dujų slėgis, veikiantis į išorę dėl slėgio gradiento, atsveria gravitacijos jėgas, veikiančias į vidų. Šis jėgų balansas galioja kiekviename žvaigždės tūrio taške. Kai jėgų pusiausvyra pažeidžiama, žvaigždė ima plėstis arba trauktis.

Energija iš žvaigždės gelmių į paviršių skverbiasi šiluminio laidumo, konvekcijos ir spinduliavimo būdais. Kuris iš šių energijos pernašos būdų vyrauja, priklauso nuo žvaigždės medžiagos skaidrumo: kuo žvaigždės medžiaga skaidresnė, tuo greičiau energija pasiekia jos paviršių. Kadangi medžiagos tankis didesnėje žvaigždės dalyje mažas, šiluminis laidumas elektronais irgi mažas (jis svarbus tik baltosiose nykštukėse). Todėl žvaigždėje energija daugiausia sklinda konvekcine ir spinduline pernaša. ***Konvekcija*** yra įkaitusių medžiagos masių judėjimas į žvaigždės išorę, žemesnės temperatūros masėms leidžiantis centro link.

* Čia kalbėsime apie vadinamas normaliąsias žvaigždes. Be jų, dar yra baltosios nykštukės ir neutroninės žvaigždės, pulsuojančios ir sproginėjančios žvaigždės, apie kurias bus rašoma atskirai.

Spindulinė energijos pernaša būna tada, kai atomai sugeria ir vėl išspinduliuoja iš vidaus sklindančius elektromagnetinius spindulius.

Fotonas, išspinduliuotas žvaigždės centre, pasiekia jos paviršių ne tiesiai, o po daugybės sugerties ir emisijos aktų, ir tai trunka apie milijoną metų. Fotonams perspinduliavimo būdu skverbiantis aukštyn, mažėja kiekvieno fotono energija, tačiau didėja jų skaičius – iš gama ir Rentgeno spindulių jie virsta ultravioletiniais, regimaisiais ar infraraudonaisiais spinduliais. Kai žvaigždės medžiaga mažiau skaidri, fotonai nesuspėja energijos pernešti, ir tada ima vyrauti energijos pernaša konvekcijos būdu, t. y. žvaigždės medžiagos turbulentiniu judėjimu. Žvaigždės medžiagos skaidrumą lemia jos cheminė sudėtis, tankis ir temperatūra. Kuo didesnis tankis ir sunkiųjų cheminių elementų kiekis, tuo mažiau skaidri medžiaga. Kylant temperatūrai, didėja ir medžiagos skaidrumas.

Medžiagos tankis žvaigždėje mažėja einant iš centro į išorę. Štai Saulės centre tankis yra 160 g/cm^3, o paviršiuje sumažėja iki 10^{-7}–10^{-8} g/cm^3, o tai yra 10^4–10^5 kartų mažiau negu atmosferos tankis ties Žemės paviršiumi. Kai spinduliai pasiekia tokio mažo tankio sluoksnius, jie jau nekliudomi apleidžia žvaigždę. Šis žvaigždės sluoksnis, kuris spinduliuoja į erdvę daugiausia energijos, vadinamas ***fotosfera.*** Panašiose į Saulę žvaigždėse fotosfera yra 200–300 km storio. Iš žemiausiojo fotosferos sluoksnio sklinda ištisinis spektras, o truputį aukštesniuose jos sluoksniuose susidaro tamsios sugerties linijos. Dauguma žvaigždžių energijos pasiskirstymu ištisiniame spektre primena įvairios temperatūros ***idealiuosius spinduolius*** (žr. **5.2** poskyrį).

Aprašytoji termodinaminė ir hidrostatinė pusiausvyra negali būti amžina. Žvaigždė pamažu netenka energijos spinduliuodama ją į šaltą kosminę erdvę. Energijos srautui palaikyti reikalinga nuolatinė jos gamyba ***branduolinėse reakcijose*** ties žvaigždės centru. Ilgainiui branduolinis kuras žvaigždės gelmėse išsenka, termobranduolinės reakcijos persikelia į tolimesnius nuo centro sluoksnius arba centre įsižiebia naujos reakcijos. Dėl to suyra termodinaminė, o kartu ir hidrostatinė pusiausvyra – žvaigždė ima pūstis arba trauktis, keičiasi jos gelmių ir paviršiaus temperatūra. Taip pamažu (milijonus ir milijardus metų) vyksta žvaigždės gyvenimas, vadinamas evoliucija arba raida.

Saulė yra viena iš žvaigždžių. Kadangi ji yra arti Žemės, ją lengva tyrinėti įvairiais metodais, ir tai duoda daug informacijos apie procesus, vykstančius kitose žvaigždėse. Saulė yra lyg savotiškas etalonas, su kuriuo lyginami kitų žvaigždžių fiziniai parametrai, pavyzdžiui, skersmenys, šviesiai, temperatūros. Geriausiai žinoma ir Saulės paviršiaus cheminė sudėtis: 74,7% vandenilio, 23,7% helio ir 1,6% sunkesniųjų cheminių elementų (masės procentai). Šioje knygoje Saulės tyrimų duomenys bus aprašyti kartu su žvaigždėmis.

5.2. ŽVAIGŽDŽIŲ SKLEIDŽIAMA IR TELESKOPŲ PRIIMAMA ENERGIJA

Kaip prisimename iš teorinės fizikos, temperatūros T spinduolio skleidžiamą energiją nusako ***Planko dėsnis***:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{2\pi\, hc^2}{\lambda^5}\left(e^{\frac{hc}{\lambda\, kT}} - 1\right)^{-1}, \qquad (5.1)$$

arba

$$\varepsilon_\nu = \frac{2\pi\, h\nu^3}{c^2}\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)^{-1}. \qquad (5.2)$$

Čia ε_λ arba ε_ν yra spinduliavimo gebos, arba išspindžio, spektrinis tankis, t. y. spinduolio paviršiaus vienetinio ploto per vienetinį laiką skleidžiama energija visomis išorės kryptimis, telpanti vienetiniame bangų ilgių intervale ties bangos ilgiu λ arba vienetiniame dažnių intervale ties dažniu ν. Čia c – šviesos greitis vakuume, h – Planko konstanta, k – Bolcmano konstanta, λ – bangos ilgis ir ν – dažnis. SI sistemoje c = 299 792 458 m/s, $h = 6{,}626176\cdot10^{-34}$ J·s ir $k = 1{,}380622\cdot10^{-23}$ J·K^{-1}. Planko dėsnis kartais užrašomas kaip spinduliuojančio paviršiaus skaisčio spektrinis tankis B_λ, t. y. spinduliavimo gebos spektrinis tankis, tenkantis vienetiniam erdviniam kampui. Tuo atveju

$$B_\lambda = \frac{\varepsilon_\lambda}{\pi}. \qquad (5.3)$$

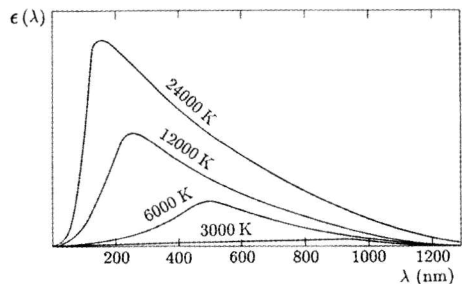
Šaltinis, kurio spinduliavimą nusako Planko dėsnis, fizikoje vadinamas absoliučiai juodu kūnu, nors spindulių šaltinis gali turėti įvairią temperatūrą, taigi ir įvairią spalvą. Šioje knygoje tokį spindulių šaltinį vadinsime ***idealiuoju spinduoliu.***

Jei ε_λ atidėsime kaip bangos ilgio funkciją, gausime spinduliavimo gebos spektrinio tankio idealaus spinduolio spektre kreivę. Trumpiau ši funkcija dažnai vadinama energijos pasiskirstymo spektre kreive. **5.1** pav. parodytos tokios kreivės keleto skirtingų temperatūrų idealiesiems spinduoliams. Akivaizdu, kad žemėjant spinduolio temperatūrai, kreivės maksimumas žemėja ir slenka į raudonąją spektro pusę. Energijos pasiskirstymo spektre kreivės maksimumo padėtį galima apskaičiuoti pagal ***Vyno poslinkio dėsnį***:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}; \qquad (5.4)$$

čia $b = 0{,}02898$ m·K, T kelvinais ir $\lambda_{\max}$ – metrais. Ši formulė gaunama diferencijuojant Planko formulę (**5.1**) pagal λ ir prilyginant išvestinę nuliui.

Žvaigždžių spinduliuojamos elek-



5.1 pav. *Spinduliavimo gebos spektrinis tankis keturių temperatūrų idealiesiems spinduoliams*

tromagnetinės energijos pasiskirstymas spektre primena idealiuosius spinduolius, kurių temperatūra yra maždaug tarp 2000 K ir 50 000 K. Suintegravę idealaus spinduolio energijos pasiskirstymo visame spektre kreivę, gauname žvaigždės vienetinio ploto skleidžiamą energiją visais bangų ilgiais, kuri proporcinga ketvirtajam temperatūros laipsniui (***Stefano ir Bolcmano dėsnis***):

$$E = \sigma T_{ef}^4; \tag{5.5}$$

čia σ = 5,67032·10^{-8} W·m^{-2}·K^{-4} yra Stefano ir Bolcmano konstanta. Į šią formulę įeinanti žvaigždės temperatūra vadinama ***efektine temperatūra***. Tai temperatūra tokio idealaus spinduolio, kurio paviršiaus vienetinis plotas visais bangų ilgiais skleidžia tiek pat energijos, kaip ir žvaigždės paviršiaus vienetinis plotas.

Jei žvaigždės energijos pasiskirstymo spektre kreivė kuriame nors bangų ilgių ruože beveik sutampa su temperatūros T idealaus spinduolio kreive, tai galime laikyti, kad sutampa ir abiejų energijos šaltinių temperatūros. Taip nustatyta žvaigždės paviršiaus temperatūra vadinama ***spalvine temperatūra***. Panašiai apibrėžiama ***skaistinė temperatūra***: tai temperatūra tokio idealaus spinduolio, kurio vienetinis plotas tam tikrame bangų ruože skleidžia tokį pat energijos srautą kaip ir tiriamoji žvaigždė.

Visatoje turbūt nerasime tokios žvaigždės, kurios spektre energijos pasiskirstymas sutaptų su vienos temperatūros idealaus spinduolio energijos pasiskirstymu. Paprastai žvaigždės energijos pasiskirstymo kreivė kuriame nors spektro ruože panaši į vienos temperatūros idealaus spinduolio kreivę, o kitame spektro ruože – į kitos temperatūros idealaus spinduolio kreivę. Tad įvairiose spektro srityse spalvinė ir skaistinė temperatūros tai pačiai žvaigždei gali šiek tiek skirtis.

Norint rasti visos žvaigždės, kurios spindulys R, spinduliavimo galią L, reikia E padauginti iš žvaigždės paviršiaus ploto:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4 . \tag{5.6}$$

Šis dydis vadinamas žvaigždės ***šviesiu*** (angl. *luminosity*) ir matuojamas vatais arba kitais galios vienetais. Iš šios formulės aišku, kad žvaigždės efektinę temperatūrą galima apibūdinti ir taip: tai temperatūra tokio idealaus spinduolio, kurio paviršiaus plotas ir šviesis yra tokie pat kaip ir tyrinėjamos žvaigždės.

Į šią formulę įeinantį žvaigždės šviesį L astronominiais stebėjimais nustatyti praktiškai neįmanoma. Iš Žemės matuojame tik ***regimąjį žvaigždės spindesį*** J, t. y. energijos srautą, krintantį į spindulių imtuvo vienetinį paviršiaus plotą, statmeną srauto sklidimo krypčiai. Taip apibūdintas regimasis spindesys yra giminingas fizikų vartojamai apšvietai ir matuojamas W/m^2.

Žvaigždės spindesys gali būti matuojamas arba visiems bangų ilgiams iš karto, arba tam tikram bangų ilgių ar dažnių intervalui. Jei tas bangų ilgių arba dažnių intervalas yra vienetinis ties bangos ilgiu λ (arba ties dažniu ν), tai gaunamas žvaigždės spindesio spektrinis tankis J_λ (arba J_ν), matuojamas W·m^{-2}·nm^{-1} arba W·m^{-2}·Hz^{-1}. Infraraudonajame ir radijo bangų ruožuose spindesio spektrinis tankis J_ν paprastai matuojamas janskiais (Jy):

$$1\ \text{Jy} = 10^{-26}\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}.$$

Spindesio spektrinio tankio priklausomybė nuo bangos ilgio (arba nuo dažnio) vadinama energijos pasiskirstymo žvaigždės spektre kreive, kuri skiriasi nuo žvaigždės spinduliuojamo energijos pasiskirstymo tik pastoviu daugikliu.

Visos žvaigždės spinduliuojama energija L Žemės nuotolyje nuo žvaigždės r pasiskirsto į plotą $4\pi r^2$, taigi iš (**5.6**) gauname, kad ties Žemės atmosferos riba į vienetinį plotą krinta energija:

$$J = \frac{L}{4\pi\, r^2} = \frac{4\pi\, R^2 \sigma T_{ef}^4}{4\pi\, r^2} = \left(\frac{R}{r}\right)^2 E\,. \qquad (5.7)$$

Ši formulė nusako ryšį tarp žvaigždės paviršiaus vienetinio ploto spinduliuojamos energijos srauto ir pasiekiančio Žemės vienetinį plotą energijos srauto. Formulė gali būti taikoma arba kuriam nors bangų ilgių intervalui arba visiems bangų ilgiams iš karto. Pirmuoju atveju žvaigždės spindesys yra ***heterochromatinis*** – J_{hetero}, o antruoju atveju jis vadinamas ***bolometriniu*** ir žymimas J_{bol}.

Iš (**5.5**) ir (**5.7**) aišku, kad

$$J_{bol} = \sigma T_{ef}^4 \left(\frac{R}{r}\right)^2. \qquad (5.8)$$

Pagal šią formulę galima apskaičiuoti efektinę temperatūrą kai kurioms artimoms Saulei žvaigždėms, kurioms kokiu nors būdu pavyksta išmatuoti kampinį spindulį. Tada, žinant žvaigždės nuotolį r, galima apskaičiuoti tikrąjį jos spindulį R ilgio vienetais. Bolometrinį spindesį J_{bol} galima išmatuoti sumuojant energijos srautą, kuris visais bangų ilgiais pasiekia Žemę. Šiuo atveju reikia įskaityti ir tą ultravioletinių ir infraraudonųjų spindulių energiją, kurios nepraleidžia Žemės atmosfera.

Jei šviesos imtuvas yra akis, tai dangaus kūno spindesys sukelia regimojo šviesumo įspūdį: taškinis dangaus kūnas atrodo šviesesnis ar silpnesnis priklausomai nuo to, kokios galios energijos srautą priima akis.

Spindesio spektrinis tankis vienetiniame bangos ilgio intervale $J(\lambda)$ ir vienetiniame dažnio intervale $J(\nu)$ susiję šitaip:

$$J(\lambda) = k\lambda^{-2}\, J(\nu)\,; \qquad (5.9)$$

čia k – koeficientas, priklausantis nuo pasirinktų spektrinio tankio ir bangos ilgio vienetų.

Dauguma šiuolaikinių šviesos imtuvų yra fotonų skaitikliai, ir todėl kartais vietoj energijos pasiskirstymo funkcijos $J(\lambda)$ geriau taikyti fotonų pasiskirstymo spektre funkciją (fotonų spektrinis tankis) $P(\lambda)$. Šios abi funkcijos tarpusavyje susijusios taip:

$$P(\lambda) = 5{,}039 \cdot 10^{18} \lambda\, J(\lambda)\,; \qquad (5.10)$$

čia $J(\lambda)$ yra išreikštas $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, $P(\lambda)$ išreikštas fotonais $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, o λ išreikšta μm.

5.3. ŽVAIGŽDŽIŲ RYŠKIAI IR SPALVOS RODIKLIAI

Praeitame poskyryje aptarėme, kad žvaigždės spindesys yra spindulių srautas, krintantis į statmeną jam vienetinį plotą. Praktikoje šis dydis matuojamas ne galia į vienetinį plotą, o specialiais astronominiais santykiniais vienetais – ***ryškiais*** m^* (angl. *magnitude*). Dviejų žvaigždžių spindesių J santykis šitaip susijęs su jų ryškių skirtumu:

$$m_1 - m_2 = -2{,}5\ \lg(J_1 / J_2); \qquad (5.11)$$

čia koeficientas –2,5 apibrėžia ryškių skalės žingsnį ir vadinamas ***Pogsono koeficientu*****. Minuso ženklas reiškia, kad kuo žvaigždė regimai šviesesnė, tuo jos ryškis mažesnis. Kitaip tariant, ryškiai nurodo ne žvaigždės šviesumą, o jos silpnumą. Tad vietoje termino „ryškis" geriau tiktų „silpnis". Nuo Hiparcho laikų (II a. pr. Kr.) priimta, kad dauguma regimai pačių šviesiausių žvaigždžių yra pirmojo ryškio, o pačios silpniausios, vos matomos plika akimi – šeštojo ryškio. Šiuo metu priimta, kad žvaigždžių ryškiams skiriantis penkiais, jų spindesių santykis yra 100. Tai reiškia, kad dvi žvaigždės, kurių spindesys skiriasi vienu ryškiu, viena už kitą silpnesnė 2,512 kartų ($\sqrt[5]{100} = 2{,}512$). Jei dviejų žvaigždžių spindesiai yra J_1 ir J_2, tai jų ryškių skirtumas

$$m_1 - m_2 = -\log_{2.512}(J_1 / J_2) \text{ arba } J_1 / J_2 = 2{,}512^{-(m_1 - m_2)}, \qquad (5.12)$$

arba dešimtainiais logaritmais:

$$m_1 - m_2 = -2{,}5\lg\ (J_1 / J_2). \qquad (5.13)$$

Ryškiais galima išreikšti ir suminį žvaigždės spindesį visame spektre, ir kokios nors apibrėžtos spektro srities spindesį. Kai ryškis atitinka suminį žvaigždės spindesį visose bangose, jis vadinamas ***bolometriniu ryškiu*** ir žymimas m_{bol}. Kai ryškis atitinka labai siaurą (pavyzdžiui, vienetinį) bangos ilgių intervalą, jis vadinamas ***monochromatiniu*** ir žymimas m_{mono}. Kai ryškis atitinka kokį nors spektro intervalą, apibrėžtą prietaiso reakcijos kreivės S_λ, jis vadinamas ***heterochromatiniu*** arba ultravioletiniu, violetiniu, mėlynuoju, žaliuoju, geltonuoju, raudonuoju, infraraudonuoju ir žymimas m_{hetero} arba kokia nors viena, daugiausia didžiąja, raide. Heterochromatinių ryškių skirtumo išraiška:

* Ryškį žyminti raidė *m* kilo iš lotyniško žodžio *magnitudo*, reiškiančio „dydis". Mat senovėje buvo manoma, kad kuo žvaigždė šviesesnė, tuo ji didesnė. Žodis *magnitude* daugelio pasaulio kalbų tebevartojamas žvaigždės ryškiui žymėti. „Ryškio" terminą įvedė Paulius Slavėnas, pakeisdamas iki tol vartotą „žvaigždinį dydį". Dėl atvirkštinio ryškio ir spindesio sąryšio terminas „ryškis" nėra pavykęs. Svarstoma, ar neverta „ryškį" pakeisti terminu *magnitudė*, vartojamu daugelyje pasaulio kalbų.

** Šį koeficientą įvedė 1857 m. anglų astronomas Normanas Pogsonas (*N. R. Pogson*) remdamasis senovės graikų mokslininko Hiparcho vizualiniais ryškių įvertinimais (150–125 m. pr. Kr.).

$$m_1 - m_2 = a - 2{,}5\lg\frac{\int J(\lambda_2)S(\lambda)d\lambda}{\int J(\lambda_1)S(\lambda)d\lambda}. \qquad (5.14)$$

Čia $S(\lambda)$ – energijos imtuvo ***reakcijos kreivė*** (angl. *response curve*). Paprastai ji apibrėžiama kaip prietaiso spektrinis jautrumas krintančiai energijai, kai spindesys, tenkantis vienetiniam λ intervalui, $J(\lambda)$ = *const* visose bangose, apimtose kreivės $S(\lambda)$.

Žmogaus akiai taip pat būdinga jos reakcijos kreivė, kuri apima regimąjį spektro ruožą nuo 400 iki 700 nm. Akis jautriausia geltoniesiems ir žaliesiems spinduliams, todėl ten yra akies reakcijos kreivės maksimumas. Akimi įvertinti žvaigždžių ryškiai vadinami ***vizualiniais ryškiais.*** Pavyzdžiui, Polukso žvaigždės vizualinis ryškis m = 1,14, Vegos m = 0,03, Sirijaus m = –1,46, Saulės m = –26,7 ir t. t. Plika akimi danguje matyti apie 5000 žvaigždžių iki 6-ojo ryškio. Pro 5 cm objektyvų skersmens žiūroną matoma apie 0,5 mln. žvaigždžių, pro 15 cm skersmens teleskopą – 6 mln., o pro didžiausius pasaulio teleskopus – keli milijardai žvaigždžių iki 22-ojo ryškio.

Kartais reakcijos kreivė $S(\lambda)$ gali būti pakeista imtuvo ***kvantinio našumo kreive*** (angl. *quantum efficiency* – QE), t. y. prietaiso jautrumu įvairiose λ, kai fotonų (kvantų) skaičius, tenkantis vienetiniam λ intervalui, P_λ = *const* visame reakcijos kreivės apimtame spektre. Imtuvo reakcija ir kvantinis našumas yra susiję taip: $S(\lambda) = k\lambda\cdot\mathrm{QE}$, čia k – koeficientas, priklausantis nuo reakcijos kreivės vienetų.

Žvaigždės spindesys priklauso nuo jos tikrosios spinduliavimo galios (šviesio) ir nuotolio. Jeigu visos žvaigždės būtų vienodai nuo mūsų nutolusios, tai jų spindesio skirtumai atitiktų šviesio skirtumus ir apibūdintų jų spinduliavimo galią. Žvaigždžių ryškiai, kuriuos jos turėtų būdamos vienodame 10 parsekų (pc) nuotolyje nuo mūsų, vadinami ***absoliutiniais ryškiais*** ir žymimi didžiąja raide M. Jų ryšį su ***regimaisiais*** (išmatuotais esant tikrajam nuotoliui r) ***ryškiais*** galima rasti iš (**5.11**) formulės, imant $m_1 = m$ ir $m_2 = M$:

$$m - M = -2{,}5\lg(J / J_{10}) = -2{,}5\lg(10^2 / r^2),$$

taigi

$$m - M = 5\lg r - 5, \qquad (5.15)$$

čia J_{10} – žvaigždės, esančios 10 pc nuotolyje, spindesys, r – žvaigždės tikrasis nuotolis parsekais*. Skirtumas $m - M$ vadinamas žvaigždės ***nuotolio moduliu*** (angl. *distance modulus*). Iš (**5.15**) galima gauti žvaigždės nuotolį parsekais:

$$\lg r = \frac{m - M + 5}{5}, \qquad (5.16)$$

jei žinomas regimasis ryškis m ir absoliutinis ryškis M. Jei turime dvi vienodo

* Parsekas (pc) yra pagrindinis astronomijoje naudojamas tarpžvaigždinių nuotolių vienetas. 1 pc = 3,2616 šviesmečių = $3{,}085678\cdot10^{13}$ km. Vieno parseko nuotolyje žvaigždės paralaksas p lygus 1″.

absoliutinio ryškio žvaigždes, esančias skirtinguose nuotoliuose r_1 ir r_2, tai šių žvaigždžių regimųjų ryškių skirtumas

$$\Delta m = 5 \lg \frac{r_1}{r_2} . \qquad (5.17)$$

Kadangi žvaigždės nuotolis parsekais lygus atvirkštinei jos paralakso, išreikšto kampinėmis sekundėmis, reikšmei, t. y. $r = 1/p''$, tai

$$m - M = -5 \lg p - 5 . \qquad (5.18)$$

Neigiamesni absoliutiniai ryškiai yra tų žvaigždžių, kurių spinduliavimo galia didesnė, t. y. kurios turi didesnį tikrąjį šviesį. Absoliutiniai, kaip ir regimieji ryškiai, gali atitikti tam tikrą bangų ilgių intervalą, apibrėžiamą reakcijos kreivės $S(\lambda)$, arba visą spektrą. Pirmuoju atveju tai bus ***heterochromatiniai absoliutiniai ryškiai*** (M_{hetero}), o antruoju atveju – ***bolometriniai absoliutiniai ryškiai*** (M_{bol}). Pastarieji nusako žvaigždės integralinį šviesį L visame spektre. Jei žvaigždės šviesis L išreiškiamas Saulės šviesio vienetais, tai galioja lygtis:

$$M_{bol} = -2{,}5 \lg (L / L_{\odot}) + M_{bol \odot} , \qquad (5.19)$$

čia $M_{bol \odot} = +4{,}72$ yra Saulės bolometrinis absoliutinis ryškis.

(5.11) formulė apibrėžia ryškių skirtumą tarp dviejų žvaigždžių tame pačiame bangų ilgių intervale. Tačiau galima tarpusavyje palyginti ir tos pačios žvaigždės spindesį, bet skirtinguose bangų ilgių ruožuose. Tarkime, m_1 ir m_2 yra monochromatiniai žvaigždės ryškiai ties λ_1 ir λ_2 bangomis. Tada

$$m_1 - m_2 = -2{,}5 \lg \frac{J(\lambda_1)}{J(\lambda_2)} \qquad (5.20)$$

bus vadinamas ***spalvos rodikliu*** (angl. *color index*). Jis rodo, kiek ryškių duotoji žvaigždė bangoje λ_1 yra šviesesnė negu bangoje λ_2. Heterochromatinių ryškių atveju su reakcijos kreivėmis $S'(\lambda)$ ir $S''(\lambda)$ spalvos rodiklis apibrėžiamas taip:

$$m_1 - m_2 = -2{,}5 \lg \frac{\int J(\lambda) S'(\lambda) d\lambda}{\int J(\lambda) S''(\lambda) d\lambda} + const ; \qquad (5.21)$$

čia

$$const = 2{,}5 \lg \frac{\int S'(\lambda) d\lambda}{\int S''(\lambda) d\lambda} . \qquad (5.22)$$

Šitaip apibrėžiant konstantą, spalvos rodiklis $m_1 - m_2$ rodo, kiek ryškių žvaigždė šviesesnė spalvoje $S'(\lambda)$ negu spalvoje $S''(\lambda)$. Tačiau ši konstanta gali būti apibūdinama ir kitaip. Pavyzdžiui, ji gali būti taip pasirinkta, kad spalvos rodiklis būtų lygus nuliui tam tikros spektrinės klasės ar temperatūros žvaigždėms.

Tarpžvaigždinėje erdvėje yra mažyčių (10^{-4}–10^{-5} mm skersmens) dulkelių, kurios žvaigždžių šviesą išsklaido ir sugeria (smulkiau žr. **6.4** skirsnyje). Labiau

sklaidomos trumpesnės bangos, todėl žvaigždės šviesa, sklisdama tarpžvaigždine erdve, pamažu silpnėja ir rausvėja. Dėl šio tarpžvaigždinio parausvėjimo žvaigždės spalvos rodiklis padidėja, nes prie tikrojo žvaigždės spalvos rodiklio prisideda vadinamasis ***spalvos ekscesas*** E (angl. *color excess*). Taigi žvaigždės spalvos rodiklis $m_1 - m_2$ paprastai susideda iš ***tikrojo*** (angl. *intrinsic*) ***spalvos rodiklio*** $(m_1 - m_2)_0$, apibūdinančio pačios žvaigždės spinduliavimą, ir spalvos eksceso:

$$m_1 - m_2 = (m_1 - m_2)_0 + E_{m_1 - m_2} . \qquad (5.23)$$

Žvaigždės spalvos ekscesas leidžia nustatyti A – spindesio susilpnėjimą (ryškiais), arba ***tarpžvaigždinę ekstinkciją*** (lot. *extinctio* – gesinimas):

$$A = RE, \qquad (5.24)$$

čia R yra šviesos ekstinkcijos ir spalvos eksceso proporcingumo koeficientas. Esant tarpžvaigždinei ekstinkcijai, žvaigždės nuotolio nustatymo formulė (**5.16**) pasikeičia:

$$\lg r = \frac{m - M + 5 - A}{5} . \qquad (5.25)$$

Įvairių temperatūrų ir absoliutinių ryškių žvaigždžių tikrieji spalvos rodikliai $(m_1 - m_2)_0$ yra skirtingi. Paprastai jie didėja žemėjant žvaigždės paviršiaus temperatūrai.

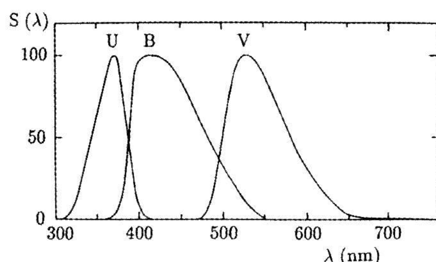
5.4. ASTROFOTOMETRINĖS SISTEMOS

Siekiant standartizuoti žvaigždžių ryškių ir spalvos rodiklių matavimą, naudojamos kelios tarptautinės astrofotometrinės sistemos. Kiekviena tokia sistema yra reakcijos kreivių rinkinys, apimantis tam tikrus spektro ruožus, teikiančius informaciją apie žvaigždžių spinduliavimo ypatumus ir tarpžvaigždinių dulkių sukeliamą šviesos ekstinkciją. Astrofotometrinių sistemų tikslai yra įvairūs. Jos naudojamos žvaigždžių spindesiui matuoti, apytiksliam energijos pasiskirstymui žvaigždžių spektruose nustatyti, žvaigždžių spektrinėms klasėms, temperatūroms, absoliutiniams ryškiams, jų paviršių gravitacijos pagreičiams ir fotosferų metalingumui nustatyti, atrinkti žvaigždes su tam tikromis pekuliarinėmis savybėmis, išmatuoti tarpžvaigždinę šviesos ekstinkciją ir kita.

Kiekviena sistemos ***reakcijos kreivė*** $S(\lambda)$ apibūdinama šiais parametrais – vidutine banga λ_0 ir kreivės pločiu ties 1/2 maksimalaus jautrio (vadinamasis reakcijos kreivės pusplotis) $\Delta\lambda$. Vidutinė banga λ_0 apskaičiuojama pagal formulę

$$\lambda_0 = \frac{\int S(\lambda)\lambda d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda} . \qquad (5.26)$$

Pagal reakcijos kreivių puspločius astrofotometrinės sistemos skirstomos į plačiajuostes (jų reakcijos kreivių puspločiai $\Delta\lambda$ > 40 nm), vidurjuostes ($\Delta\lambda$



5.2 pav. *UBV sistemos reakcijos kreivės, sunormuotos į 100 ties jautrio maksimumu*

tarp 10 ir 40 nm) ir siaurajuostes ($\Delta\lambda$ < 10 nm). Tarp plačiajuosčių sistemų svarbiausia yra tarptautinė *UBV* sistema*, kurios reakcijos kreivės parodytos **5.2** pav., o parametrai išvardyti **5.1** lentelėje. Šią sistemą 1953 m. pasiūlė amerikietis Haroldas Džonsonas (*H. L. Johnson*). Šioje sistemoje yra trys ryškiai ir du spalvos rodikliai *U–B* ir *B–V*. *V* ryškis, atitinkantis žaliąją spektro sritį, kurio λ_0 = 550,5 nm, yra priimtas laikyti tarptautiniu. Jis naudojamas kaip viena pagrindinių žvaigždės charakteristikų, reikalingų absoliutiniam ryškiui nustatyti. Absoliutinis ryškis *V* juostoje žymimas M_V. Spalvos rodiklis *B–V* yra naudojamas kaip apytikslė žvaigždės fotosferos temperatūros funkcija. Kitų šios sistemos juostų prasmė bus paaiškinta **5.11** poskyryje.

5.1 lentelė. *UBV* sistemos reakcijos kreivių vidutiniai bangų ilgiai ir puspločiai

Juosta	*U*	*B*	*V*
λ_0, nm	364,2	441,6	550,5
$\Delta\lambda$, nm	42,3	96,0	83,0

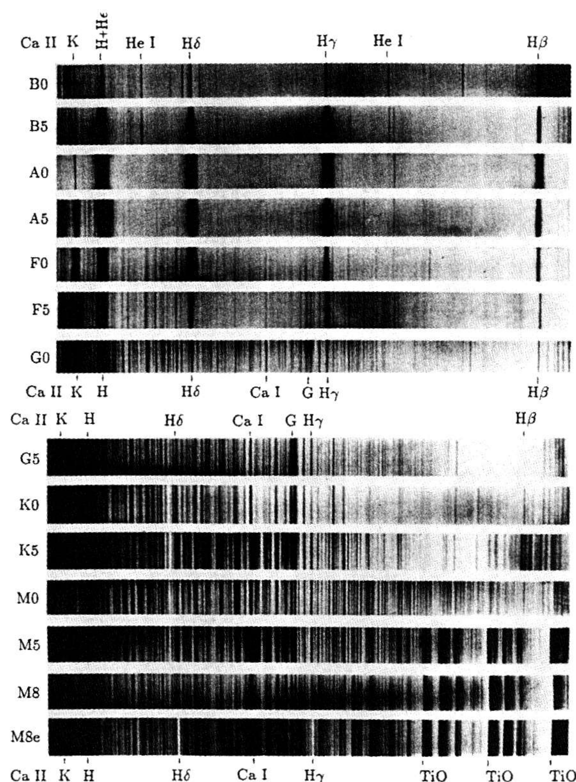
Vidurjuostės ir siaurajuostės sistemos daugiausia skirtos žvaigždžių fizinių savybių tyrimui, ir apie jas bus rašoma **5.11** poskyryje.

5.5. ŽVAIGŽDŽIŲ SPEKTRAI

Grįžkime prie elektromagnetiniais spinduliais skleidžiamos žvaigždžių energijos. Jau minėjome, kad energijos pasiskirstymas žvaigždžių spektruose bangų ilgiais primena įvairių temperatūrų idealiųjų spinduolių energijos pasiskirstymą. Kadangi žvaigždžių fotosferų temperatūros maždaug yra tarp 50 000 K ir 2000 K, tai pagal Vyno poslinkio dėsnį jų ištisinio spektro energijos maksimumas turi būti maždaug tarp 100 nm ultravioletinėje srityje ir 1 μm infraraudonojoje srityje. Vidutinių temperatūrų (7000–4000 K) žvaigždžių fotosferų ištisinio spektro energijos maksimumas tenka regimajai spektro sričiai.

Ištisiniai žvaigždžių spektrai yra išraižyti tūkstančių įvairaus tamsio sugerties linijų. Trumpai apžvelkime, kaip jos susidaro. Iš fotosferos išspinduliuotas ištisinis spektras praeina pro retesnius žvaigždės atmosferos sluoksnius, sudarytus iš neutralių arba vieną ar du kartus jonizuotų įvairių cheminių elementų atomų, kurie, peršokdami į aukštesnius energijos lygmenis, sugeria tam tikrų bangos ilgių fotonus, sklindančius iš fotosferos mūsų link. Po kurio laiko tie patys

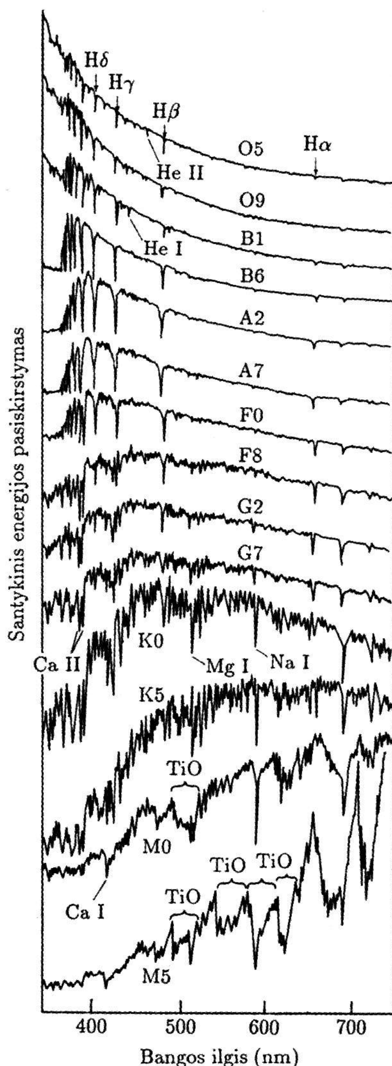
* *UBV* sistemos juostos žymimos anglų k. žodžių, reiškiančių spalvas, pirmosiomis raidėmis: *U – ultraviolet* (ultravioletinis), *B – blue* (mėlynas) ir *V – visual* (vizualinis arba regimasis).



5.3 pav. *Taip atrodo įvairių spektrinių klasių žvaigždžių spektrų fotografijos mėlynojoje srityje. Įvardytos tamsiausios sugerties linijos ir juostos*

atomai vėl peršoka atgal į žemesnius energijos lygmenis, išspinduliuodami tokio pat bangos ilgio fotonus, kaip ir sugertieji. Tačiau šis perspinduliavimas vyksta jau į bet kurią pusę (t. y. nebūtinai mūsų link). Todėl mus pasiekiančių fotonų skaičius sumažėja – ištisiniame spektre atsiranda tamsus tarpelis, cheminiam elementui būdinga spektro sugerties linija. Dalis fotonus sugėrusių atomų net nespėja jų perspinduliuoti – gretimų atomų ar laisvų elektronų smūgiai sugertųjų fotonų energiją, virtusią sužadintųjų atomų energija, paverčia šilumine energija.

Kiekvienos žvaigždės spektre stebimos įvairių cheminių elementų sugerties linijos. Vienose iš jų tamsiausios yra vandenilio ir helio, kitose – kalcio, natrio, geležies ir kitų metalų linijos. Peršasi mintis, kad stebimieji įvairių cheminių elementų linijų tamsių skirtumai atsiranda dėl skirtingos tų elementų atomų gausos žvaigždžių fotosferose. Tačiau taip nėra. Didžiulė dauguma žvaigždžių turi vienodą fotosferų cheminę sudėtį, artimą Saulės fotosferos sudėčiai (žr. **1.1** poskyrį). Stebimoji sugerties linijų tamsių įvairovė atsiranda daugiausia dėl žvaigždžių fotosferų temperatūros skirtumų. Kaip vėliau patirsime, tam tikrą



5.4 pav. *Įvairių spektrinių klasių žvaigždžių spektrų registrogramos regimojoje srityje. Įvardytos tamsiausios sugerties linijos ir juostos*

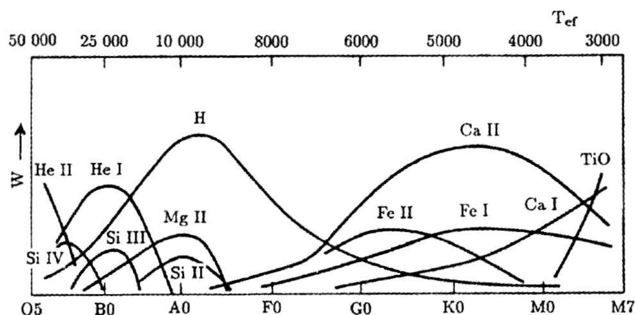
įtaką linijų išvaizdai turi ir dujų slėgis fotosferoje, priklausantis nuo gravitacijos pagreičio dydžio.

Temperatūra ir slėgis veikia sugerties linijas per atomų jonizacijos ir sužadinimo laipsnį. Įvairių elementų atomai turi skirtingus jonizacijos ir sužadinimo potencialus, todėl skirtingai reaguoja į fizines sąlygas fotosferoje. Smulkiau apie spektrų susidarymo mechanizmą žvaigždės fotosferoje skaitykite **5.14** poskyryje.

Harvardo observatorijos (JAV) astronomai Edvardas Pikeringas (*E. C. Pickering*) ir Anė Kenon (*A. J. Cannon*) sukūrė vadinamąją Harvardo spektrų klasifikacijos schemą, pagal kurią žvaigždės skirstomos į spektrinių klasių seką O–B–A–F–G–K–M, kuri atitinka žemėjančią paviršiaus temperatūrą nuo 50 000 iki 2000 K. Spektrinės klasės nuo O iki F vadinamos ankstyvomis, o nuo G iki M – vėlyvomis. Kiekviena spektrinė klasė dar skirstoma į 10 poklasių, žymimų skaičiais nuo 0 iki 9. Įvairių spektrinių klasių žvaigždžių spektrai mėlynojoje dalyje parodyti **5.3** ir **5.4** pav. **5.5** paveiksle pateiktas kokybinis vaizdas apie tamsiausias atomų linijas įvairių klasių spektruose.

Spektrinės linijos skiriasi gyliu ir forma. Mažo tamsio linijų profilis primena V raidę, o tamsesnės linijos turi plačius sparnus. Sugerties linijų tamsis žvaigždžių spektruose matuojamas ***ekvivalentiniais pločiais*** *W* (angl. *equivalent width*), išreikštais bangų ilgio vienetais (pvz., nanometrais*). Ekvivalentinis plotis yra plotis stačiakampio, kurio pagrindas atitinka nulinį energijos srautą, aukštis lygus ištisinio spektro energijos srautui linijos centre, o plotas yra lygus visos linijos sugertam energijos srautui. Linijos ekvivalentinio pločio apibrėžimą iliustruoja **5.6** pav. Viršutinėje paveikslo da-

* Astronomijoje spektro linijų bangų ilgiai dažnai matuojami angstremais (Å): 1 Å = 0,1 nm.



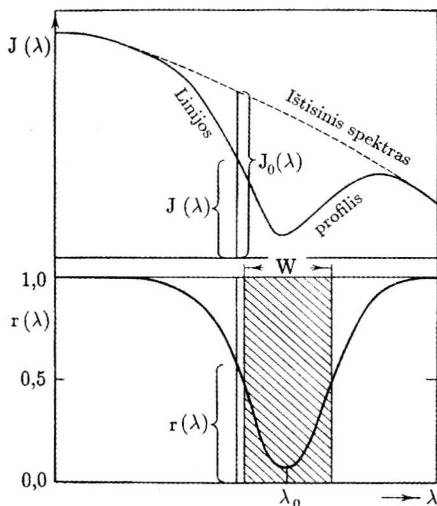
5.5 pav. *Tamsiausių sugerties linijų ekvivalentinio pločio W priklausomybė nuo spektrinės klasės arba fotosferos efektinės temperatūros*

lyje parodyta siauro spektro ruožo su linija registrograma. Brūkšniuota kreivė žymi hipotetinę ištisinio spektro eigą spektrinės linijos apimtame ruože. Jei bangoje λ linijos viduje žvaigždės spindesio spektrinis tankis yra $J(\lambda)$, o toje pat bangoje ištisinio spektro spektrinis tankis yra $J_0(\lambda)$, tai santykis

$$r(\lambda) = J(\lambda)/J_0(\lambda) \qquad (5.27)$$

yra vadinamas spindesio liekamuoju stipriu bangoje λ. Liekamojo stiprio priklausomybė spektrinėje linijoje ir jos aplinkoje nuo bangos ilgio parodyta apatinėje **5.6** paveikslo dalyje; iš šio brėžinio matyti, kad plotas, apribotas linijos profilio ir ištisinio spektro (jo $r(\lambda) = 1$ visose bangose) yra

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - r(\lambda))\, d\lambda \,. \qquad (5.28)$$



5.6 pav. *Sugerties spektrinės linijos ekvivalentinio pločio apibrėžimas*

Jei žvaigždės spektras yra <10 nm/mm dispersijos, jame gerai matyti linijos, kurių W > 0,05 nm. Tamsiausių spektro linijų W yra keleto nm dydžio.

O spektrinės klasės žvaigždžių fotosferų temperatūra tokia aukšta (25–50 tūkst. K), kad jose dėl susidūrimų dauguma atomų yra jonizuoti. Dėl to neutralaus vandenilio (H I) linijos yra palyginti mažo tamsio, bet vis dėlto gerai matomos (W = 0,1–0,3 nm). Regimojoje spektro srityje matomos vandenilio ***Balmerio serijos*** linijos, atitinkančios atomų šuolius iš antrojo energijos lygmens į aukštesniuosius. Tamsiausios Balmerio serijos linijos yra Hα (656,3 nm), Hβ (486,1 nm),

Hγ (434,0 nm), Hδ (410,2 nm), Hε (397,0 nm), H ζ (388,9 nm) ir Hη (383,5 nm). Artėjant į ultravioletinę spektro sritį, Balmerio linijos vis tankėja, ir ties Balmerio serijos riba, kuri yra ties 364,6 nm, jos susilieja, pereidamos į ***Balmerio šuolį***, t. y. į staigų ištisinio spektro susilpnėjimą už Balmerio serijos ribos. O klasės žvaigždėse matomos taip pat vieną kartą jonizuoto helio (He II) linijos, kurios yra panašaus tamsio kaip ir vandenilio linijos.

B klasės žvaigždėse (fotosferos temperatūra tarp 25 ir 10 tūkst. K) vandenilio linijos daug tamsesnės ir jos vis tamsėja pereinant nuo B0 iki B9 poklasių, pasiekdamos W = 1,0–1,5 nm. Pirmuosiuose B žvaigždžių poklasiuose taip pat matomos daug mažesnio tamsio (W = 0,15 nm) neutralaus helio (He I) linijos. Tamsiausios jų yra ties 381,9, 402,6, 447,2 ir 587,6 nm.

Ultravioletiniuose O ir B klasių žvaigždžių spektruose, kurie stebimi tik už Žemės atmosferos, matyti daugybė tamsių kelis kartus jonizuotų lengvųjų elementų linijų: C IV ties 155,0 nm, Si IV ties 139,4 ir 140,3 nm, C II ties 133,5 nm, Si III ties 129,5 – 130,3 nm, Si III ties 120,6 nm, C III ties 117,5 nm, N II ties 108,5 nm, O VI ties 103,2 – 103,8 nm, N III ties 99,0 nm, C III ties 97,7 nm. Dauguma šių linijų yra rezonansinės, t. y. kylančios iš atomo pagrindinio energijos lygmens. Jų W siekia 1,2 nm. Ultravioletinėje srityje taip pat matomos tamsios vandenilio ***Laimano serijos*** linijos, jos tamsiausios linijos yra Lα (121,6 nm), Lβ (102,6 nm), Lγ (97,3 nm) ir Lδ (95,0 nm), o serijos riba yra ties 91,15 nm. Infraraudonojoje spektro srityje yra šios vandenilio serijos: ***Pašeno*** (tarp 1875 ir 820 nm), ***Breketo*** (tarp 4051 ir 1458 nm), ***Pfundo*** (tarp 7458 ir 2279 nm) ir kitos.

A spektrinės klasės žvaigždėse (fotosferos temperatūra tarp 10 ir 7,5 tūkst. K) labai tamsios visų serijų vandenilio linijos – jos tamsiausios yra A1–A2 poklasiuose. Balmerio serijos linijų W pirmuosiuose A poklasiuose siekia 2 nm, Laimano serijos linija Lα – net 6,5 nm. Šių temperatūrų žvaigždžių spektruose taip pat matomos tamsėjančios žemėjant temperatūrai kalcio, magnio, silicio, geležies ir kitų vienąkart jonizuotų atomų linijos. Spektrinei klasifikacijai ypač svarbios yra Ca II dubleto linijos ties 396,8 ir 393,4 nm, žymimos raidėmis H ir K. Ultravioletinėje spektro srityje jas atitinka Mg II dubleto linijos ties 280,3 ir 279,6 nm, žymimos mažosiomis raidėmis h ir k. Artimojoje infraraudonojoje spektro srityje B ir A žvaigždžių spektruose stebimos tamsios neutralaus deguonies O I linijos: tripletas ties 777,2, 777,4 ir 777,5 nm ir dubletas ties 844,6 nm. A klasės žvaigždėse pasirodo Ca II tripletas ties 849,8, 854,2 ir 866,2 nm, kurio linijos vis tamsėja, žemėjant temperatūrai, pasiekdamas didžiausią tamsį G klasės žvaigždėse (W iki 0,5 nm).

F spektrinės klasės žvaigždėse (fotosferos temperatūra tarp 7,5 ir 6 tūkst. K) vandenilio serijų linijų tamsis mažėja žemėjant temperatūrai (paskutiniuose poklasiuose jų W = 0,3 nm), bet darosi tamsesnės vieną kartą jonizuotų ir neutralių metalų linijos. F8 spektriniame poklasyje Ca II H ir K linijos savo tamsiu susilygina su vandenilio Balmerio serijos linijomis. Ultravioletinėje

spektro srityje metalų linijų tiek daug, kad jos vietomis susilieja į krūvas, sudarydamos tolydinio spektro duobes (depresijas).

G spektrinės klasės žvaigždėse (fotosferos temperatūra tarp 6000 ir 5200 K) vandenilio linijų tamsis vis mažėja, o metalų linijų – didėja. Dauguma metalų linijų priklauso neutraliems ar vieną kartą jonizuotiems geležies ir kitų metalų atomams. Vietomis metalų linijos susispietusios į krūvas ir sudaro gilias ištisinio spektro depresijas. Tokia yra depresija ties 430 nm, žymima raide G ir depresija ties 515 nm, žymima raide b. Saulė yra G2 spektrinės klasės žvaigždė.

K spektrinės klasės žvaigždėse (fotosferos temperatūra tarp 5200 ir 3600 K) vandenilio linijų beveik nematyti tarp daugybės metalų linijų, kurios ištisai dengia visą ultravioletinę, regimąją ir artimą infraraudonąją spektro sritis. Ypač tamsios yra Ca II H ir K linijos (*W* iki 2,5–3,0 nm), Ca I linija ties 422,7 nm (*W* iki 0,5 nm), Fe I linijos ties 404,6, 406,4, 427,2, 432,6, 438,4, 440,5 ir 527,0 nm (*W* = 0,1–0,5 nm), žaliasis Mg I tripletas ties 516,7, 517,3 ir 518,4 nm (*W* iki 0,3 nm), geltonasis Na I dubletas ties 589,0 ir 589,6 nm (*W* iki 1 nm), infraraudonasis Ca II tripletas (*W* iki 0,6 nm). K klasės žvaigždžių spektruose taip pat matomos šios molekulinės juostos: CN juostos su kraštais ties 421,6, 388,3 ir 359,0 nm, MgH juostos su kraštais ties 484,5, 521,1 ir 562,1 nm, CaH juostos su kraštais ties 638,5, 690,8 ir 694,6 nm, CH juosta ties 430 nm ir kt.

M spektrinės klasės žvaigždžių spektruose (fotosferos temperatūra tarp 3600 ir 2000 K) matoma daugybė neutralių metalų linijų ir molekulinių juostų. Ypač tamsios yra titano oksido (TiO) juostos, kurios išraižo visą spektrą nuo 417 nm iki 1 μm. Infraraudonojoje spektro srityje matomos taip pat vanadžio oksido (VO), vandens garų (H_2O), anglies monoksido (CO), silicio oksido (SiO), ciano (CN) juostos. Labai tamsios yra Ca II H ir K linijos, Ca I linija 422,7 nm, geltonasis Na I dubletas ir infraraudonasis Ca II tripletas. Kai kurių M klasės žvaigždžių spektruose matomos emisinės vandenilio Balmerio serijos linijos.

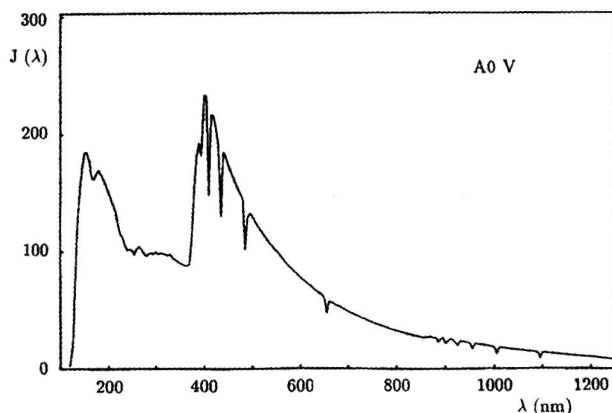
Dar vėsesnių (2000–1500 K) L spektrinės klasės žvaigždžių spektruose (jos vadinamos rudosiomis nykštukėmis, žr. **5.27** skirsnį.) TiO ir VO juostos silpnos arba visai dingusios, puikiai matomos geležies hidrido (FeH) ir chromo hidrido (CrH) juostos. Taip pat juose matomos gilios šarminių metalų (Na, K, Cs, Li) linijos. Pačios vėsiausios rudosios nykštukės ($<$1500 K) priskiriamos T spektrinei klasei. Jų spektruose matomos vandens garų (H_2O) ir FeH juostos, neutralių Cs ir Li linijos, kartais metano (CH_4) juostos.

Žvaigždžių spektrinės klasės nustatomos pagal tai, kokio tamsio yra vienos ar kitos sugerties linijos arba pagal tam tikrų linijų tamsio santykius. Klasifikuojant žvaigždžių spektrus, jie dažnai lyginami su kitų žvaigždžių – standartų spektrais. Spektrinei klasifikacijai paprastai naudojama mėlynoji spektro sritis tarp Balmerio serijos ribos ir Hβ linijos. Tam gali būti naudojami

įvairios dispersijos spektrai, gauti objektyvine prizme arba spektrografu. Norint klasifikuoti žvaigždes vieno spektrinio poklasio tikslumu, reikalingi ne mažesnės kaip 10 nm/mm dispersijos spektrai.

5.6. ENERGIJOS PASISKIRSTYMAS ŽVAIGŽDŽIŲ SPEKTRUOSE

Galime teigti, kad žvaigždės ištisiniame spektre apytiksliai spinduliuoja įvairių temperatūrų idealieji spinduoliai (žr. 5.2 poskyrį). Karščiausių žvaigždžių energijos pasiskirstymo (spindesio spektrinio tankio) maksimumas yra ultravioletinėje, o vėsiausių žvaigždžių – infraraudonojoje spektro srityje. Regimojoje spektro srityje stipriausiai spinduliuoja vidutinių temperatūrų žvaigždės. Čia nagrinėsime žvaigždžių energijos pasiskirstymo spektruose kreives, apskaičiuotas vienetiniam bangos ilgio intervalui, t. y. spindesio spektrinį tankį $J(\lambda)$. Energijos pasiskirstymo kreivės vienetiniam dažnio intervalui $J(\nu)$ savo išvaizda šiek tiek skiriasi: jų energijos maksimumas yra pasislinkęs į raudonąją spektro pusę. Energijos pasiskirstymas pagal bangų ilgius ištisiniame spektre panašiausias idealiajam spinduoliui yra O spektrinės klasės žvaigždėse. Žemesnės paviršiaus temperatūros žvaigždėse aptinkami dideli nukrypimai nuo idealaus spinduliavimo. B, A ir F spektrinių klasių žvaigždžių spektruose matomi Laimano, Balmerio, Pašeno ir kiti šuoliai ties atitinkamomis vandenilio serijų ribomis. Šiuos šuolius sukelia elektromagnetinių bangų sugertis, kai vandenilio atome elektronas išmušamas iš pirmo, antro, trečio ir t. t. lygmens ir tampa laisvu, t. y. atomas jonizuojamas. Šie šuoliai atsiranda O klasės žvaigždėse, stiprėja kartu su vandenilio linijomis ir pasiekia didžiausią aukštį pirmuosiuose A spektriniuose poklasiuose. Pereinant prie žemesnės temperatūros žvaigždžių, šuoliai žemėja ir išnyksta maždaug ties G5 spektri-

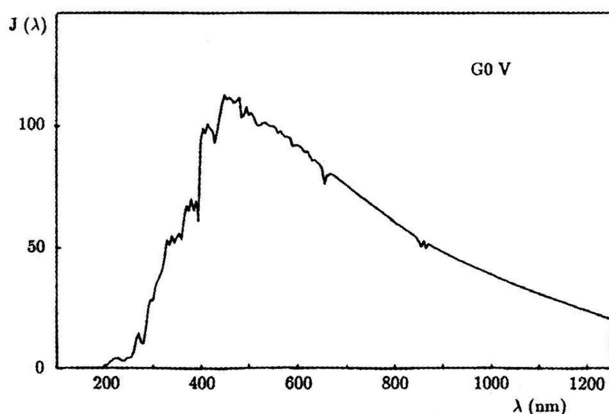


5.7 pav. *Energijos pasiskirstymas A0 V klasės žvaigždės spektre. Matyti Balmerio ir Pašeno serijų linijos ir Balmerio bei Laimano šuoliai*

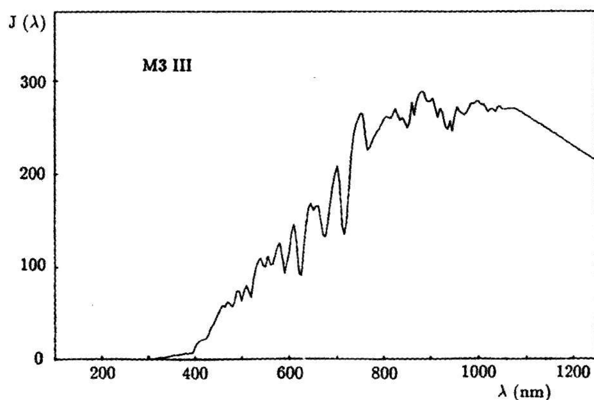
niu poklasiu. Aukščiausi yra Laimano ir Balmerio šuoliai, atitinkantys vandenilio atomų jonizaciją iš pirmojo ir antrojo lygmens (5.7 pav.).

Kitas svarbus veiksnys, sukeliantis energijos pasiskirstymo žvaigždžių spektruose nukrypimus nuo idealaus spinduolio, yra elementų, sunkesnių už helį, ypač įvairių metalų, sugerties linijų telkiniai. Žemėjant žvaigždžių fotosferų temperatūrai, metalų sugerties linijos užplūsta spektrą iš trumpųjų bangų pusės. Jau B ir A klasių žvaigždėse ultravioletinėje spektro srityje matomi tūkstančiai linijų, kurios susilieja tarpusavyje ir stipriai pažemina ištisinio spektro lygį. Šis reiškinys vadinamas spektro ***blanketavimu*** (angl. *blanket* – antklodė). Linijų antplūdis mėlynojoje spektro srityje pasireiškia F klasės žvaigždžių spektruose. G klasės žvaigždėse linijos dengia jau ir žaliąją spektro sritį, o K ir M klasių žvaigždėse visa regimoji spektro sritis iki pat raudonojo krašto užklota linijomis, ir ištisinio spektro nebesimato. Vietomis stiprių linijų sambūriai sudaro gilias ištisinio spektro depresijas. Jų ypač daug ultravioletinėje spektro srityje. Regimajame spektre stiprios depresijos yra jau minėtos G depresija ties 430 nm ir b depresija ties 515 nm.

Dėl minėtų priežasčių λ_{max}, nustatoma pagal Vyno poslinkio dėsnį, mažai tinka žvaigždžių temperatūrai įvertinti, nes energijos pasiskirstymas jų spektruose gerokai skiriasi nuo idealaus spinduolio. Karščiausioms O klasės žvaigždėms energijos maksimumas tenka tolimai ultravioletinei sričiai tarp Laimano serijos ribos ties 91,2 nm ir bangos ilgio 110 nm. B3 poklasio žvaigždės turi energijos maksimumą ties 115 nm, B7 poklasio – ties 140–150 nm, A0 poklasio – ties 170–180 nm. Dėl Laimano ir Balmerio šuolių B ir A klasių žvaigždžių energijos pasiskirstymo kreivės turi du maksimumus. Daugumoje B klasės žvaigždžių ultravioletinis maksimumas yra aukštesnis negu maksimumas prieš Balmerio šuolį. Abu maksimumai susilygina B9–A0 poklasiuose, o A klasės žvaigždėse aukščiausias taškas yra jau ties 400 nm, t. y. prieš Balmerio



5.8 pav. *Energijos pasiskirstymas G0 V klasės žvaigždės spektre. Matyti tamsiausios sugerties linijos*

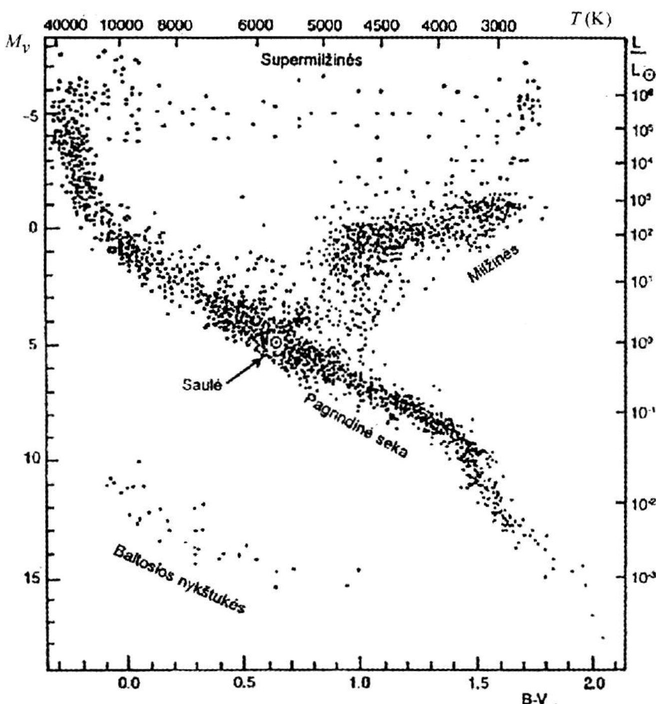


5.9 pav. *Energijos pasiskirstymas M3 III klasės žvaigždės spektre. Matyti TiO molekulių sugerties juostos*

šuolį. F, G ir K spektrinių klasių žvaigždžių energijos pasiskirstymo maksimumas yra regimojoje spektro srityje (**5.8** pav.), M žvaigždžių – infraraudonojoje srityje (**5.9** pav.). Nuo energijos pasiskirstymo spektre priklauso plika akimi matoma žvaigždžių spalva: O ir B žvaigždės yra melsvos, A ir F – baltos, G – geltonos, K – oranžinės ir M – raudonos.

5.7. HERCŠPRUNGO IR RASELO DIAGRAMA

1911–1913 m. danų astronomas Einaras Hercšprungas (*E. Hertzsprung*) ir amerikietis Henris Raselas (*H. N. Russell*) atrado, kad absoliutinio ryškio priklausomybės nuo spektrinės klasės arba spalvos rodiklio diagramoje žvaigždės išsidėsto ne bet kaip, o sudaro tam tikras sekas (**5.10** pav.). Tokios diagramos vadinamos ***HR diagramomis*** pagal pirmąsias autorių pavardžių raides. Didžiulė dauguma žvaigždžių sudaro seką, einančią nuo karštų ir didelio šviesio žvaigždžių link raudonų mažo šviesio žvaigždžių. Tai ***pagrindinė seka*** (angl. *main sequence*), kuriai priklauso ir mūsų Saulė (spektrinė klasė G2, absoliutinis ryškis M_V = +4,82), **5.10** paveiksle pažymėta ratuku. G–K–M spektrinių klasių pagrindinės sekos žvaigždės dar vadinamos ***nykštukėmis*** (angl. *dwarfs*). Nuo pagrindinės sekos ties Saule atsiskiria ***submilžinių*** (angl. *subgiants*) ***ir raudonųjų milžinių*** (angl. *red giants)* ***seka***, kuri eina aukštyn ir į dešinę, raudoniausioms žvaigždėms pasiekdama M_V = 0. Diagramos viršutinėje dalyje maždaug M_V = –5 lygyje horizontaliai eina ***supermilžinių seka*** (angl. *supergiant sequence*), kuri tęsiasi nuo karščiausių iki vėsiausių žvaigždžių. Diagramos kairiajame apatiniame kampe yra ***baltųjų nykštukių seka*** (angl. *white dwarf sequence*), kuri maždaug lygiagreti pagrindinei sekai, bet eina maždaug 10 ryškių žemiau.



5.10 pav. *Hercšprungo ir Raselo diagrama, kurios koordinatėse atidėtas M_V absoliutinis ryškis (kairėje), šviesis Saulės šviesio vienetais (dešinėje), B–V spalvos rodiklis (apačioje) ir temperatūra (viršuje). Įvardytos įvairaus šviesio klasių sekos*

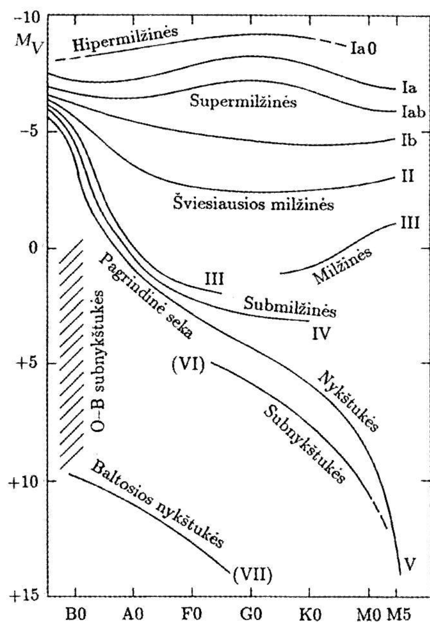
Matome, kad tokio pat spalvos indekso, taigi maždaug tokios pat temperatūros ir spektrinės klasės žvaigždės gali turėti labai skirtingus šviesius arba absoliutinius ryškius. Pavyzdžiui, ties $B–V = 0$ (tai atitinka A0 spektrinę klasę) pagrindinės sekos žvaigždžių ir supermilžinių M_V skiriasi 6 ryškiais; ties $B–V = +1{,}5$ (tai atitinka M0 spektrinę klasę) nykštukės yra silpnesnės už milžines 10 ryškių, o už supermilžines 15 ryškių. Tokie dideli žvaigždžių šviesio skirtumai sąlygoja tiek spektrinių sugerties linijų tamsius, tiek energijos pasiskirstymą ištisiniame spektre.

Žvaigždės milžinės fotosfera yra daug gilesnė ir ten medžiaga daug retesnė negu tokios pat paviršiaus temperatūros pagrindinės sekos žvaigždėje. Dėl to atomai rečiau susiduria su elektronais ir ilgiau išlieka jonizuotoje būsenoje. Tad neutralių ir jonizuotų elementų linijų tamsių santykis gali būti žvaigždės absoliutinio ryškio kriterijus. Be to, dažniau susiduriant atomams, spektrinės linijos darosi platesnės dėl vadinamojo ***Štarko reiškinio*** (atomų energijos lygmenų išplitimas veikiant kitų artimų atomų elektriniams laukams, smulkiau žr. **5.14** poskyryje). Dėl to, mažėjant žvaigždės šviesiui, Balmerio linijos darosi vis platesnės, ir artėjant prie serijos ribos jos vis labiau

persikloja ir susilieja: supermilžinės (pvz., Denebo) spektre galima matyti iki 28 Balmerio linijų, o pagrindinės sekos žvaigždės (pvz., Vegos) spektre matoma tik 20 linijų. Be to, supermilžinėse Balmerio linijos daug mažesnio tamsio negu pagrindinės sekos žvaigždėse. Balmerio linijų tamsis ir Balmerio šuolio aukštis pagrindinės sekos žvaigždėse pasiekia maksimumą ties A1–A2 poklasiais, o supermilžinėse – ties F0 poklasiu.

Žemų temperatūrų žvaigždėse šviesio skirtingumai keičia kai kurių metalų linijų tamsį. Štai Ca I linija ties 422,7 nm, žaliasis Mg I tripletas, geltonasis Na I dubletas yra daug tamsesni nykštukių negu milžinių ar supermilžinių spektruose. CN juostos kinta priešingai – jos tamsėja didėjant žvaigždės šviesiui. Nuo šviesio priklauso ir ištisinis vėsių žvaigždžių spektras: tos pačios spektrinės klasės milžinių energijos pasiskirstymas gerokai raudonesnis negu nykštukių.

Iš žvaigždžių klasifikacijos pagal spektrines klases nustatomas tik vienas jų atmosferų parametras – temperatūra. Žvaigždžių šviesio skirtumams įvertinti įvestos ***šviesio klasės*** (angl. *luminosity classes*). Tai 1943 m. padarė amerikiečių astronomai Viljamas Morganas (*W. W. Morgan*) ir Filipas Kynanas (*P. C. Keenan*), sukūrę dvimatę žvaigždžių spektrų klasifikaciją, kuri vadinama ***MK sistema***. Kaip ir Harvardo klasifikacijos sistemoje, MK sistemoje raidė ir skaičius žymi temperatūrinę spektrinę klasę ir poklasį. Po to seka romėniškas skaičius, žymintis priklausomumą vienai ar kitai šviesio klasei. Išskiriamos šios šviesio klasės (**5.11** pav.): V – pagrindinė seka, IV – submilžinės, III – normalios milžinės, II – šviesios milžinės, I – supermilžinės. Kartais dar naudojama VI šviesio klasė žymėti subnykštukėms, t. y. tokioms žvaigždėms, kurios HR diagramoje yra žemiau pagrindinės sekos, ir VII šviesio klasė žymėti baltųjų nykštukių sekai. Vėliau buvo įvesta nulinė (0) šviesio klasė žymėti ***hipermilžinėms*** (angl. *hypergiants*), t. y. ypač didelio šviesio žvaigždėms. Kiekviena šviesio klasė dažnai dar skirstoma į a, ab ir b poklasius, čia a yra didesnio šviesio žvaigždės negu ab, o ab – didesnio šviesio negu b. Tad spektrinė klasifikacija MK sistemoje atrodo taip: Spika yra B1 V klasės žvaigždė, Arktūras yra K2 III klasės žvaigždė, Denebas yra A2 Ia klasės žvaigždė ir t. t.



5.11 pav. *Hercšprungo ir Raselo diagrama su pažymėtomis šviesio klasių sekomis*

MK spektrinės klasės nustatomos iš spektrų, kurių dispersija yra maž-

daug 10 nm/mm arba didesnė. Mažesnės dispersijos spektruose per silpnai matomos sugerties linijos, reikalingos šviesio klasei nustatyti.

5.11 pav. šviesio klasių sekos parodytos linijomis. Iš tikrųjų žvaigždės yra ne tik ant šių linijų, o užima tam tikro pločio juostas. O–B–A–F spektrinių klasių V–IV–III šviesio klasių žvaigždės išsidėsto ištisine juosta (žr. **5.10** pav.), ir dalijimas šviesio klasėmis yra sąlyginis: žvaigždės ties tos plačios juostos viršutiniu pakraščiu vadinamos III šviesio klasės žvaigždėmis, o ties apatiniu pakraščiu – V šviesio klasės žvaigždėmis, IV šviesio klasė yra per vidurį. Pagrindinės sekos žvaigždės, HR diagramoje esančios žemiausiai, dažnai vadinamos ***nulinio amžiaus pagrindinės sekos*** (angl. *zero-age main sequence* – sutrumpintai ZAMS arba NAPS) žvaigždėmis. Šis pavadinimas susijęs su žvaigždžių evoliucija.

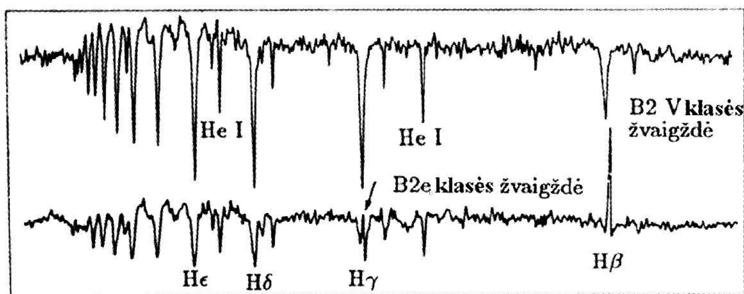
5.8. PEKULIARINIŲ SPEKTRŲ ŽVAIGŽDĖS

Be aprašytųjų normaliųjų įvairių temperatūrų ir įvairių šviesio klasių žvaigždžių, dar yra žvaigždžių, kurių spektrai rodo tam tikras jų ypatybes. Visos tokios žvaigždės vadinamos pekuliarinėmis, tačiau tarp jų išsiskiria įvairios grupės, kurių skirtinga fizinė prigimtis ir raidos etapas. Apžvelgsime įvairių rūšių pekuliarines žvaigždes, pradėdami nuo karščiausiųjų.

5.8.1. Emisinės O, B ir A žvaigždės

Nemaža B spektrinės klasės žvaigždžių dalis savo spektruose, be sugerties linijų, dar turi emisijos linijų. Tokios žvaigždės žymimos spektrine klase ir poklasiu su požymiu e, pavyzdžiui, B1 Ve, B3 IVe ir t. t. Tokių žvaigždžių daugiausia pasitaiko tarp B1– B3 poklasių V–IV–III šviesio klasių (iki 20 % nuo bendro tų tipų žvaigždžių skaičiaus). Šviesiausios dangaus skliaute ***Be žvaigždės*** yra Kasiopėjos γ, Persėjo φ ir Vandenio π. Šios rūšies žvaigždžių spektruose matoma emisija linijose Hα, Hβ, o kartais ir kitose Balmerio serijos linijose (**5.12** pav), taip pat pirmosiose Pašeno, Breketo ir Pfundo serijų linijose. Visos Laimano serijos linijos yra sugertinės. Kartais emisijoje matomos kai kurios Fe II linijos, infraraudonieji O I ir Ca II tripletai, ultravioletinis Mg II dubletas ir He I linija ties 1083 nm. Balmerio linijos rodo emisijos silpnėjimą einant prie aukštesnių serijos narių: Hα emisija yra stipriausia, Hβ linija yra bent 8 kartus silpnesnė, o Hγ linijoje emisija vos pastebima. Kartais emisija matoma vien tik Hα linijoje.

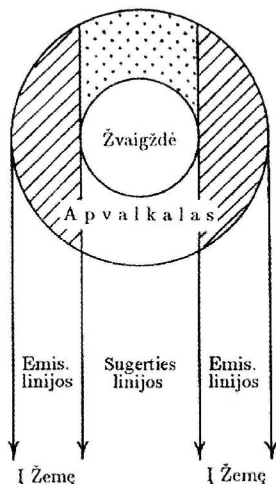
Emisijos stipris daugumoje Be žvaigždžių kinta – kartais emisija išnyksta, ir visos Balmerio linijos matomos sugertyje, taigi žvaigždė tampa normalia.



5.12 pav. *Normalios B2 V klasės žvaigždės ir emisinės Be klasės žvaigždės spektrų registrogramų mėlynojoje srityje palyginimas. Be klasės žvaigždės spektre matoma stipri emisija Hβ linijoje ir silpna emisija Hγ linijoje*

Daugelyje emisinių žvaigždžių stebima ir sugertis, ir emisija toje pačioje spektro linijoje. Paprastai linijos sugerties ir emisijos dedamosios yra skirtingo pločio. Pavyzdžiui, plačios sugerties linijos centre kartais matoma siaura emisijos linija.

Emisijos linijos Be žvaigždėse atsiranda karštame disko pavidalo jonizuotų dujų apvalkale (**5.13** pav.), kuris susidaro aplink pusiaują dėl labai greito (iki 500 km/s) žvaigždės sukimosi apie ašį ir dėl stipraus žvaigždinio vėjo (elektringųjų dalelių srauto).



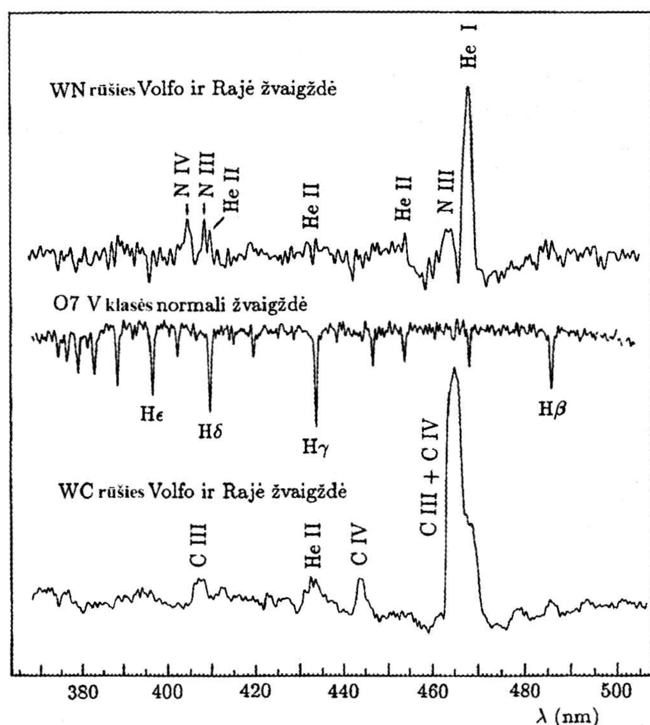
5.13 pav. *Emisijos ir sugerties linijų susidarymas žvaigždės fotosferoje ir dujiniame apvalkale. Emisijos linijos susidaro užbrūkšniuotoje apvalkalo dalyje, kuri nesiprojektuoja į žvaigždės paviršių. Taškuota apvalkalo dalis iš Žemės nematoma*

Be klasės žvaigždžių energijos pasiskirstymas spektre gerokai skiriasi nuo normalių tos pat spektrinės ir šviesio klasės žvaigždžių, nes Be žvaigždžių spektrai susideda iš persiklojusių pačios žvaigždės ir jos apvalkalo spektrų. Apvalkalo spektras susidaro iš ištisinio spektro, kurį spinduliuoja laisvieji elektronai protonų elektriniame lauke, rekombinuojantys elektronai, užgrobiami į antrąjį, trečiąjį ir aukštesnius vandenilio atomo lygmenis, taip pat elektronai, šuoliuodami iš aukštesniųjų į žemesniuosius vandenilio atomo energijos lygmenis. Laisvieji elektronai spinduliuoja ištisinę emisiją infraraudonojoje srityje, $\lambda > 1$ μm ilgio bangose. Rekombinuojantys elektronai spinduliuoja ištisinę emisiją į trumpųjų bangų pusę nuo Balmerio, Pašeno ir kitų vandenilio serijų ribų. Vykstant elektronų šuoliams žemyn, iš vieno energijos lygmens į kitą spinduliuojamos Balmerio, Pašeno ir kitų serijų emisijos linijos.

Tarp O klasės žvaigždžių apie 13% taip pat turi emisijos linijas; jos vadinamos ***Of žvaigždėmis***. Šviesiausios dangaus skliaute tokių žvaigždžių atstovės yra Cefėjo λ (O6f) ir Laivagalio ζ (O5f). Šios rūšies

žvaigždės turi plačias He II emisijos linijas ties 164,0, 468,6 ir 1012,4 nm, N III ties 463,4, 464,1 ir 464,2 nm, C III ties 464,7–465,1, 569,6 ir 970,1–971,5 nm. Ypač stipri yra infraraudonoji jonizuoto helio emisija ties 1012,4 nm. Vandenilio serijų linijos paprastai yra sugertyje. Spektrų pobūdis rodo laipsnišką perėjimą nuo normalių O klasės žvaigždžių į Of žvaigždes. Greičiausiai jos skiriasi dalelių vėjo stiprumu: dėl stipraus vėjo Of žvaigždės netenka apie 4 kartus daugiau medžiagos negu normalios O klasės žvaigždės. Emisijos linijos susidaro plėtriame dujų apvalkale arba tankiame vėjyje, sklindančiame į visas puses nuo žvaigždės paviršiaus. Kaip Be, taip ir Of žvaigždžių spektruose matoma ištisinė infraraudonoji emisija, kurią skleidžia laisvieji elektronai, esantys žvaigždę supančiame apvalkale.

Nors retai pasitaikanti, bet gana egzotiška yra ***Volfo ir Rajė*** (WR) emisinių O klasės žvaigždžių grupė. Jų spektruose matyti nepaprastai plačios ir stiprios lengvųjų elementų emisijos linijos (**5.14** pav.). Išsiskiria dvi WR žvaigždžių rūšys. Vienos jų rodo stiprias anglies ir deguonies linijų emisijas (WC rūšis), kitos – azoto linijų emisijas (WN rūšis). Anglies linijos priklauso C II, C III ir C IV jonams, deguonies linijos – O III, O IV ir O V jonams, o azoto linijos – N III, N IV ir N V jonams. Abiejų rūšių WR žvaigždės turi He I, He II ir



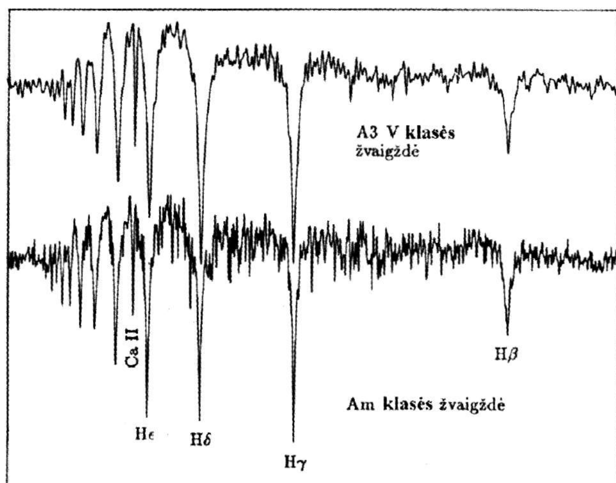
5.14 pav. *Normalios O7 V klasės žvaigždės ir dviejų rūšių Volfo ir Rajė žvaigždžių spektrų registrogramų mėlynojoje srityje palyginimas*

kartais H I emisijos linijų. Emisijos linijos yra stiprios ir plačios, jos dengia beveik visą spektrą nuo 100 nm ultravioletinėje srityje iki 4 μm infraraudonojoje srityje. WR žvaigždžių emisijos linijos susidaro tankioje plėtrioje atmosferoje, tiksliau – optiškai tankiame vėjyje, kurio greitis siekia šimtus ir tūkstančius km/s. Dėl Doplerio reiškinio šių žvaigždžių spektro linijos labai išplinta, o medžiagos netektis siekia net $5 \cdot 10^{-5}$ Saulės masės per metus.

Yra dar viena A ir B spektrinių klasių emisinių žvaigždžių grupė, vadinama ***Herbigo Ae/Be*** žvaigždėmis (Džordžas Herbigas (*G. H. Herbig*), JAV astronomas). Jų spektrai primena Be žvaigždžių spektrus, tačiau greta vandenilio serijų emisinių linijų dar yra emisija Ca II K linijoje, He I linijose 587,6 ir 1083 nm, geltonajame Na I dublete, infraraudonuosiuose O I ir Ca II tripletuose, ultravioletiniame Mg II dublete. Ypač stipri Lα emisija. Balmerio šuolis Ae/Be žvaigždėse yra žemesnis, o infraraudonoji ištisinė emisija stipresnė. Šių žvaigždžių spektras susideda iš trijų dedamųjų: pačios A arba B klasės žvaigždės, ją supančio karštų dujų apvalkalo (kaip ir Be žvaigždėse) ir šiltų dulkių apvalkalo spektrų. Herbigo Ae/Be žvaigždės yra palyginti jaunos (keli milijonai metų) ir aptinkamos tankiuose dujų ir dulkių debesyse.

5.8.2. Pekuliarinės cheminės sudėties A ir B klasių žvaigždės

Didžioji dauguma žvaigždžių, esančių Saulės aplinkoje, savo atmosferose turi (pagal masę) 74,7% vandenilio, 23,7% helio ir apie 1,6% kitų cheminių elementų. Tačiau tarp A ir B žvaigždžių yra nemaža tokių, kurių atmosferų

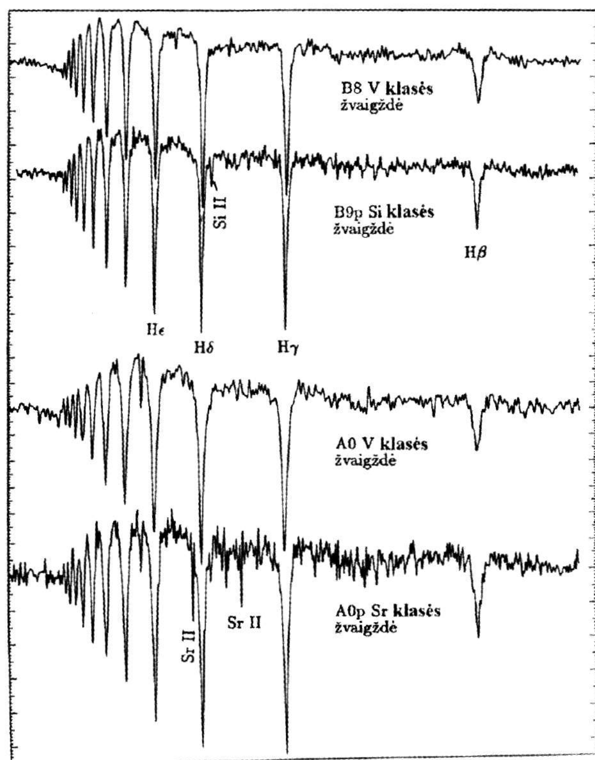


5.15 pav. *Normalios A3 V klasės žvaigždės ir metalingosios žvaigždės spektrų registrogramų palyginimas. Abiejų žvaigždžių temperatūros panašios. Pastebėkite daug gausesnes ir gilesnes metalų sugerties linijas Am žvaigždės spektre*

cheminė sudėtis gana savotiška. Šios chemiškai pekuliarios (CP) žvaigždės skirstomos į 5 grupes.

Pirmoji grupė yra ***metalingosios žvaigždės*** (žymimos CP-1 arba Am). Jos sudaro 5% visų A1–A3 žvaigždžių, 20% visų A3–A7 žvaigždžių ir 32% visų A7–F0 žvaigždžių, kurių šviesio klasės V, IV arba III. Kelios panašios žvaigždės žinomos ir tarp pirmųjų F poklasių. Yra nuoseklus perėjimas nuo normalių į metalingąsias. Metalingųjų žvaigždžių spektruose beveik visų metalų (išskyrus kalcį ir skandį) sugerties linijos gerokai tamsesnės negu normaliose tų pat spektrinių poklasių žvaigždėse (**5.15** pav). Cheminės sudėties tyrimai rodo, kad jų fotosferose yra nuo 10 iki 100 kartų daugiau metalų negu normalių žvaigždžių fotosferose. Dėl to, kad metalų linijos stipriai sugeria ištisinį spektrą, Am žvaigždės yra gerokai silpnesnės mėlynojoje ir violetinėje spektro srityje negu tų pat temperatūrų normalios žvaigždės.

Antroji grupė yra pekuliarinės ***CP-2 arba Ap klasės žvaigždės***. Jų yra 10% tarp B5–A5 V–IV klasių žvaigždžių, daugiausia tarp B8 ir A0 poklasių. Pagal

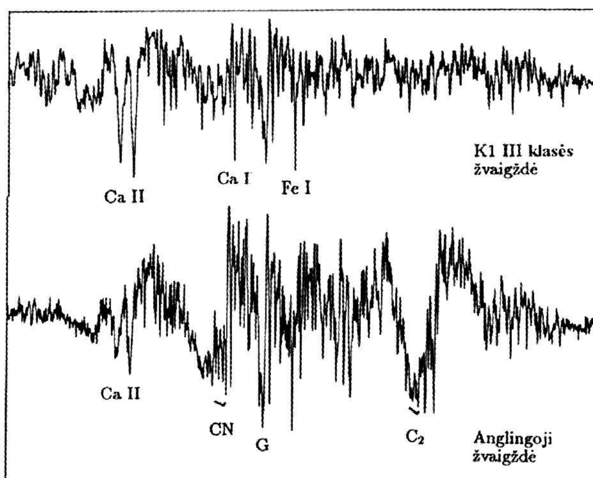


5.16 pav. *Viršuje – normalios B8 V klasės žvaigždės ir pekuliarinės B9p silicio žvaigždės spektrų registrogramų palyginimas. Apačioje – normalios A0 V klasės žvaigždės ir A0p stroncio žvaigždės spektrų registrogramų palyginimas. Pastebėkite gilias silicio ir stroncio linijas, kurios normaliose panašių temperatūrų žvaigžėse beveik nematomos*

cheminės sudėties anomalijas CP-2 grupė skirstoma į du pogrupius – ***Si*** (***silicio***) ***žvaigždes*** tarp B5–B8 žvaigždžių ir ***Cr–Sr–Eu*** (***chromo***, ***stroncio*** ir ***europio***) ***žvaigždes*** tarp A0–A5 poklasių. Palyginti su normaliomis žvaigždėmis silicio žvaigždės turi tamsesnes silicio, galio, kriptono, stroncio, itrio, cirkonio ir lantanidų linijas ir mažesnio tamsio helio ir kalcio linijas (**5.16** pav. viršuje). Cr–Sr–Eu žvaigždės turi tamsesnes geležies ir artimų jai periodinės sistemos elementų ir daugumos sunkesnių už geležį elementų linijas, ypač stroncio ir europio (**5.16** pav. apačioje). Daugumos CP-2 žvaigždžių periodiškai kinta ryškis, spektro linijų tamsis ir magnetinio lauko stipris. Šių žvaigždžių atmosferose kai kurie cheminiai elementai ne tolygiai pasklidę po žvaigždės paviršių, o koncentruojasi į dideles dėmes, simetriškas magnetiniam laukui. Be to, žvaigždės magnetinio lauko ašis nesutampa su jos sukimosi ašimi, todėl į mus periodiškai atsukami magnetiniai poliai ir įvairių cheminių elementų koncentracijos dėmės.

Trečioji grupė yra pekuliarinės ***Hg-Mn (gyvsidabrio-mangano)*** arba ***CP-3 žvaigždės***, aptinkamos tarp B5 ir B9 spektrinių poklasių. Palyginti su normaliomis žvaigždėmis jų spektruose matomos gerokai patamsėjusios fosforo, mangano, galio, stroncio, itrio, cirkonio ir gyvsidabrio linijos, o helio, aliuminio, kalcio ir nikelio linijos yra mažesnio tamsio negu normaliose tų pat temperatūrų žvaigždėse. Kitais požiūriais jos beveik nesiskiria nuo normalių B klasės žvaigždžių.

Ketvirtoji grupė (***CP-4***) yra B klasės ***žvaigždės su helio trūkumu***. Nors šių žvaigždžių spalvos indeksai ir temperatūros atitinka B3–B5 spektrines klases, pagal helio linijų tamsį jos atrodo kaip B8–B9 žvaigždės. Manoma, kad žvaigždės su helio trūkumu yra panašios į CP-2 ir CP-3 žvaigždes, bet yra aukštesnės temperatūros.

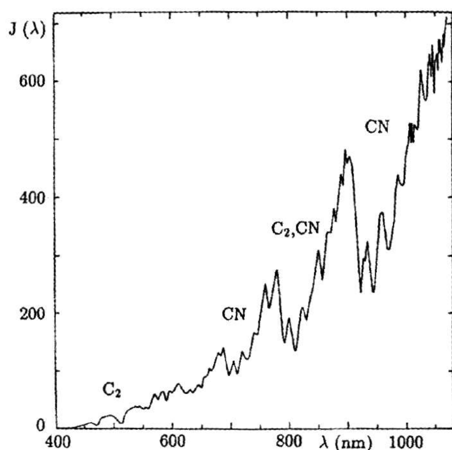


5.17 pav. *Normalios K1 III klasės milžinės ir panašios temperatūros anglingosios žvaigždės spektrų registrogramų mėlynojoje srityje palyginimas. Anglingosios žvaigždės spektre matomos gilios C_2, CN ir CH molekulių sugerties juostos*

Penktoji grupė yra B klasės ***žvaigždės su helio pertekliumi*** ir vandenilio trūkumu, kitaip – helingosios žvaigždės. Jos turi gerokai tamsesnes helio linijas ir vos pastebimas arba visai nematomas vandenilio linijas. Cheminė analizė rodo, kad vandenilio kiekis helingųjų žvaigždžių atmosferose yra sumažėjęs šimtus ir tūkstančius kartų. Kai kurių iš jų kinta ryškis, spektro linijų tamsis ir magnetinio lauko stipris.

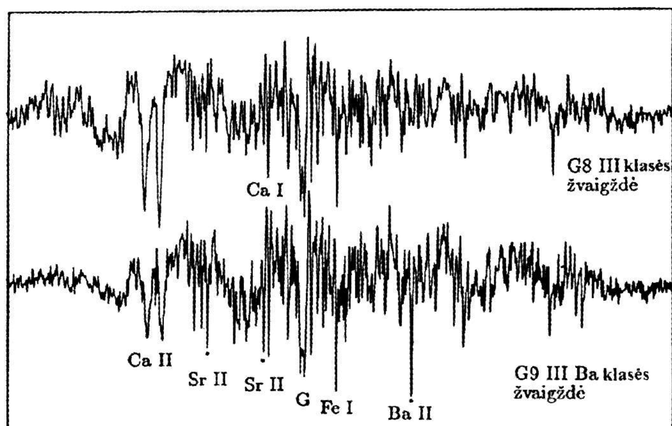
5.8.3. Anglingosios žvaigždės

Žinomi tūkstančiai žemos temperatūros žvaigždžių milžinių, kurių spektruose matomos labai tamsios anglies molekulės C_2, ciano CN, anglies vandenilio CH, silicio karbido SiC_2 ir kitų anglies junginių sugerties juostos (**5.17** pav.). Cheminė analizė rodo, kad šių žvaigždžių atmosferose anglies yra iki 10 kartų daugiau negu deguonies, kai normaliose žemų temperatūrų žvaigždėse yra atvirkščiai – deguonies yra maždaug 2 kartus daugiau negu anglies. Anglingosios žvaigždės skirstomos į ***R ir N spektrines klases***: pagal temperatūras R klasė atitinka normalias G5–K5 žvaigždes, o N – paskutinių poklasių M klasės žvaigždes. R žvaigždžių spektruose metalų linijos beveik nesiskiria nuo normaliųjų G ir K milžinių. N žvaigždėse yra anomalijų – ypač stiprus geltonasis Na I dubletas, Li I linija ties 670,8 nm ir Ba II linijos ties 455,4 ir 493,4 nm. Visų N žvaigždžių temperatūros yra <3200 K; jų ištisinis spektras bangose, kurių $\lambda < 440$ nm, yra ypač silpnas – šios ***violetinės depresijos*** priežastis nevisiškai aiški: galbūt ją sukelia labai tamsios C_3 molekulės ir kitų dar neatpažintų molekulių sugerties juostos. **5.18** pav. parodytas energijos pasiskirstymas N spektrinės klasės anglingosios žvaigždės 19 Psc spektre.



5.18 pav. *Energijos pasiskirstymas anglingosios žvaigždės 19 Psc spektre. Matomos ypač gilios molekulių C_2 ir CN sugerties juostos infraraudonojoje spektro srityje. Žvaigždė labai raudona – jos spindesio spektrinio tankio maksimumas yra ilgesnėse bangose negu 1 μm*

Daugumos anglingųjų žvaigždžių spektruose matomos normalaus tamsio metalų sugerties linijos, atitinkančios jų atmosferų temperatūrą. Tačiau yra negausi vadinamųjų ***CH klasės žvaigždžių grupė***, kurių spektruose matomos labai tamsios CH linijos ties 431,6 ir 388,3 nm, o C_2 ir CN juostos beveik normalaus tamsio. Metalų linijos (išskyrus barį ir stroncį) CH žvaigždžių spektruose tokios silpnos, kad esant mažai dispersijai matomos tik Ca II H ir K linijos. Net tokios linijos, kaip Ca I 422,7 nm ir geltonasis Na I dubletas, kurios ypač tamsios anglingose žvaigždėse, CH žvaigždėse



5.19 pav. *Normalios G8 III klasės milžinės ir panašios temperatūros baringosios milžinės spektrų registrogramų mėlynojoje srityje palyginimas. Baringosios žvaigždės spektre matyti gilios bario ir stroncio jonų sugerties linijos*

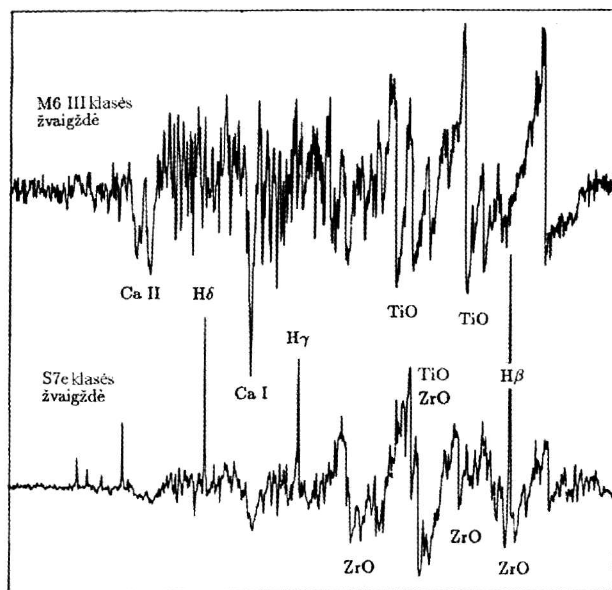
yra sunkiai pastebimos. Kadangi metalų linijos mažai sugeria ištisinį CH klasės žvaigždžių spektrą, tai šių žvaigždžių spinduliavimas ultravioletinėje spektro srityje gerokai stipresnis negu kitų tipų anglingųjų žvaigždžių. Vis dėlto violetinė depresija matoma ir CH klasės žvaigždžių spektruose. CH žvaigždės juda erdve Saulės atžvilgiu dideliais greičiais ir priklauso Galaktikos sferoidui.

5.8.4. Baringosios žvaigždės

Šios klasės žvaigždės (milžinės ir submilžinės) pratęsia anglingąsias N žvaigždes link aukštesnių fotosferos temperatūrų, atitinkančių G ir K klasių milžines ir submilžines. Baringųjų žvaigždžių mažos dispersijos spektruose matyti patamsėjusios Ba II (455,4 ir 493,4 nm) ir Sr II (407,7 ir 421,5 nm) linijos, taip pat CH, C_2 ir CN juostos, pastebima ir violetinė depresija (**5.19** pav.). Cheminė analizė parodė, kad baringųjų žvaigždžių fotosferose anglies yra daugiau negu deguonies, t. y. jos yra anglingųjų žvaigždžių rūšis. Taip pat rasta žvaigždžių, kurios pagal cheminę sudėtį yra tarpinės tarp normaliųjų ir baringųjų.

5.8.5. Cirkoningosios žvaigždės

Yra žemų temperatūrų žvaigždžių milžinių, kurių spektruose greta titano oksido (TiO) sugerties juostų matomos taip pat cirkonio oksido (ZrO) juostos. Abiejų molekulių juostų tamsio santykiai įvairiose žvaigždėse gerokai skiriasi. Kai kuriose jų vyrauja TiO, o ZrO yra tik pėdsakai. Kitose yra atvirkščiai – vyrauja ZrO, o TiO beveik nėra (**5.20** pav.). Žvaigždės, kurių spektruose vyrauja ZrO juostos, vadinamos ***S spektrinės klasės žvaigždėmis***.

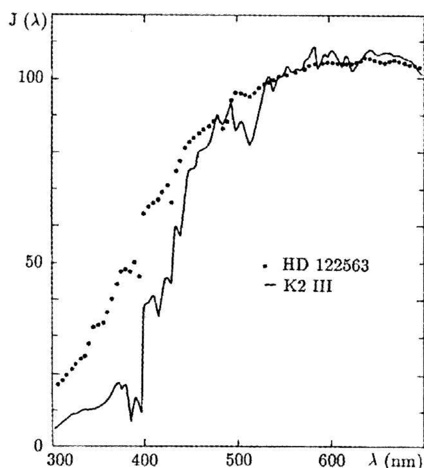


5.20 pav. *M6 III klasės milžinės ir panašios temperatūros S klasės cirkoningosios milžinės spektrų registrogramų mėlynojoje spektro srityje palyginimas. M klasės žvaigždės spektre vyrauja TiO molekulių juostos, o S klasės žvaigždės spektre – ZrO molekulių juostos. S klasės spektre dar matomos stiprios vandenilio emisijos linijos, susidarančios žvaigždę gaubiančiame dujų apvalkale*

Žvaigždės, kuriose vyrauja ZrO, bet kartu yra ir TiO, vadinamos SM klasės žvaigždėmis. Kai vyrauja TiO, bet matomas ir ZrO, turime MS klasės žvaigždes. Žemiausių temperatūrų S klasės žvaigždėse matomos dar ir lantano oksido (LaO) juostos.

Cirkoningųjų žvaigždžių cheminė analizė rodo, kad sekoje M–MS–SM–S nuosekliai kinta ir Zr/Ti gausų santykis (nuo 0,006 M klasės žvaigždėse iki 0,06–0,18 S klasės žvaigždėse) ir O/C gausų santykis (nuo 1,7 M klasės žvaigždėse iki 1,02 S klasės žvaigždėse). Taigi S žvaigždes galima laikyti tarpine grandimi tarp M ir N žvaigždžių. Kai anglies ir deguonies gausos žvaigždės atmosferoje susilygina (O/C = 1,0), beveik visi deguonies ir anglies atomai susijungia į anglies monoksidą CO, ir nelieka laisvo deguonies ZrO oksidui ir laisvos anglies C_2, CN ir CH molekulėms susidaryti. Dėl to tokiose žvaigždėse visos molekulių juostos silpnos arba jų visai nėra. Tokios žvaigždės žymimos SN ir NS raidėmis priklausomai nuo to, kokių molekulių pėdsakai matomi – jei spektre yra ZrO pėdsakų, tai žvaigždė priskiriama SN klasei, jei yra C_2 ar CN pėdsakų – NS klasei. Abiem atvejais matomos tamsios Ba II ir Sr II linijos, labai tamsus geltonasis Na I dubletas ir gana tamsi ličio Li I linija ties 670,8 nm. Violetinėje srityje SN ir NS žvaigždės, kaip ir kitos anglingosios žvaigždės, turi ištisinio spektro depresiją.

5.8.6. Nemetalingosios žvaigždės



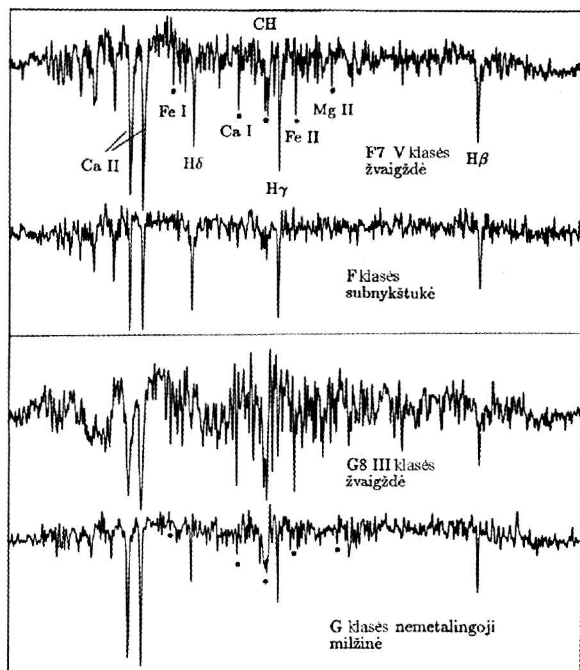
5.21 pav. *Energijos pasiskirstymo nemetalingosios milžinės HD 122563 ir normalios K2 III klasės žvaigždės spektruose palyginimas. Abi žvaigždės turi panašias efektines temperatūras*

Tarp F–G–K nykštukių ir G–K milžinių pasitaiko žvaigždžių, kurių spektruose metalų linijos yra ne tokios tamsios kaip normalių žvaigždžių spektruose. Kiekybinė cheminė analizė rodo, kad tokių žvaigždžių atmosferose geležies ir kitų metalų gausa yra mažesnė negu Saulėje nuo kelių iki keleto šimtų kartų. Rasta žvaigždžių, kuriose metalų trūkumas siekia 200 tūkst. kartų. Kai metalų trūkumas yra didesnis negu 100 kartų, mažos dispersijos spektruose F–G–K klasių žvaigždėse nebesimato daugumos atomų linijų ir molekulių juostų. Matomos tik vandenilio linijos ir Ca II H ir K linijos, bet ir pastarųjų tamsis yra kelis kartus mažesnis negu normaliose žvaigždėse.

Energijos pasiskirstymas nemetalingųjų nykštukių (jos dažnai vadinamos ***subnykštukėmis***), submilžinių ir milžinių spektruose gerokai skiriasi nuo normalios cheminės sudėties tų pačių temperatūrų ir šviesio klasių žvaigždžių. Svarbiausias skirtumas yra tas, kad nemetalingosios žvaigždės daug stipriau spinduliuoja mėlynojoje, violetinėje ir ultravioletinėje spektro dalyse (**5.21** pav.). Taip yra dėl to, kad metalų linijos labiausiai susitelkusios trumpabangėje spektro dalyje, ir todėl, esant mažesniam jų tamsiui, sukeliamas mažesnis blanketavimo efektas (žr. **5.6** poskyrį). Silpnos metalų linijos gerai parodomos **5.22** paveiksle, kuriame subnykštukės ir nemetalingosios milžinės spektrai mėlynojoje srityje palyginti su normalios cheminės sudėties ir panašios temperatūros žvaigždžių spektrais. Nemetalingosios žvaigždės taip pat neturi ištisinio spektro depresijos ties 500–520 nm, kurią normaliose žvaigždėse sukelia Mg I tripletas ir MgH molekulinė juosta.

Žinoma ir M spektrinės klasės nykštukių, turinčių didelį metalų trūkumą. Palyginti su normaliomis M nykštukėmis jos turi ne tokias tamsias TiO juostas, bet normalias ar net patamsėjusias CaH ir MgH juostas ir Ca I liniją ties 422,7 nm. Nemetalingųjų M klasės milžinių spektruose TiO juostos matomos net prie labai mažų metalingumų, tačiau jos yra ne tokios tamsios kaip normalių M klasės žvaigždžių spektruose.

Visos mažai metalų turinčios žvaigždės yra labai senos (amžius >10 mlrd. metų) ir priklauso Galaktikos sferoidui (žr. **7** skyrių).



5.22 pav. *Viršuje – normalios F7 V klasės žvaigždės ir nemetalingosios subnykštukės spektrų mėlynojoje srityje palyginimas. Apačioje – palyginti normalios cheminės sudėties milžinės ir nemetalingosios milžinės spektrai. Lyginamų žvaigždžių poros turi panašias temperatūras*

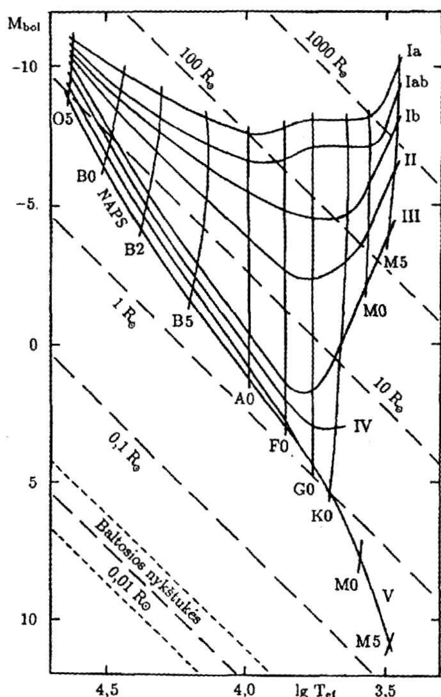
5.9. ŽVAIGŽDŽIŲ DYDŽIAI, MASĖS IR GRAVITACIJOS PAGREIČIAI PAVIRŠIUJE

Formulėje (**5.6**) žvaigždės šviesį, spindulį ir temperatūrą išreiškus Saulės vienetais ir tą formulę išlogaritmavus, gauname:

$$\lg\ (L/L_{\odot}) = 2\lg\ (R/R_{\odot}) + 4\lg\ (T_{\text{ef}}/T_{\text{ef}\odot})\ . \qquad (\mathbf{5.29})$$

Ši formulė tinka žvaigždės spinduliui nustatyti, jei žinomas jos bolometrinis šviesis L ir efektinė temperatūra T_{ef}. Abu šie dydžiai gali būti nustatyti iš stebėjimų: bolometrinis šviesis gali būti gautas iš bolometrinio spindesio J_{bol}, kaip buvo aprašyta **5.2** poskyryje, o efektinė temperatūra T_{ef} gali būti įvertinta iš jonizacinės ar spalvinės temperatūros. Jonizacinė temperatūra gaunama iš spektro linijų tamsių, o spalvinė temperatūra – iš energijos pasiskirstymo spektre arba iš spalvos rodiklių, išmatuotų fotometriškai.

Apskaičiuotieji įvairių MK klasių žvaigždžių spinduliai Saulės vienetais yra pateikti **14**-oje lentelėje knygos pabaigoje. Matome, kad didžiausios yra



5.23 pav. *Hercšprungo ir Raselo diagrama, kurios koordinatėse atidėti absoliutiniai bolometriniai ryškiai (apibūdinantys žvaigždės šviesį) ir efektinių temperatūrų logaritmai. Parodytos įvairių šviesio klasių sekos (I–V), vienodų spektrinių klasių linijos ir vienodų spindulių tiesės, NAPS – nulinio amžiaus pagrindinė seka*

raudonosios M klasės supermilžinės, jų spinduliai didesni už Saulės spindulį iki 1000 kartų. Tarp normalių žvaigždžių mažiausios yra raudonosios nykštukės – jų spindulys mažesnis už Saulės spindulį 5–10 kartų. Dar mažesnės yra rudosios nykštukės ($\sim 0{,}1R_\odot$) ir baltosios nykštukės (0,01–0,001 $R_\odot$). HR diagramoje, kurios koordinatėse atidėti dydžiai M_{bol} (arba lg $L/L_\odot$) ir lg $T_{ef}/T_{ef\odot}$, vienodo spindulio linijos yra lygiagretės tiesės, einančios iš kairės ir viršaus į dešinę ir žemyn (**5.23** pav.).

Kampinį žvaigždės spindulį ρ″, matomą iš Žemės, galima įvertinti žinant jos nuotolį r ir spindulio dydį ilgio vienetais R: tg $\rho'' = R/r$. Labai mažiems kampams tinka formulė

$$\rho'' = 206265\, R/r. \qquad (\mathbf{5.30})$$

Pagal ją gauname, kad net artimiausių ir didžiausių žvaigždžių kampiniai skersmenys yra < 0″,05, o tai yra gerokai mažiau negu didžiausių antžeminių teleskopų skiriamoji geba, kuri dėl atmosferos trukdymų visada yra ≥ 0″,1. Interferenciniais metodais (naudojant dviejų veidrodžių arba kelių teleskopų interferometrus, speklinterferometrus) pavyksta padidinti skiriamąją teleskopų gebą ir išmatuoti žvaigždžių skersmenis iki 0″,0002 dydžio. Žvaigždžių skersmenys taip pat nustatomi okultacijų metodu (kai jas uždengia Mėnulio kraštas arba kita dvinarės sistemos žvaigždė). Šiais metodais išmatuoti kelių šimtų žvaigždžių skersmenys.

Kadangi gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje g yra

$$g = GM/R^2; \qquad (\mathbf{5.31})$$

(čia G yra gravitacijos konstanta, o M – žvaigždės masė), tai įrašę šią jo išraišką į (**5.29**) formulę, gauname:

$$\lg\frac{L}{L_\odot} = \lg\frac{M}{M_\odot} - \lg\frac{g}{g_\odot} + 4\lg\frac{T_{ef}}{T_{ef\odot}}; \qquad (\mathbf{5.32})$$

čia $L_\odot = 3{,}85\cdot10^{26}$ W, $M_\odot = 1{,}989\cdot10^{30}$ kg, $g_\odot = 2{,}74\cdot10^4\,\mathrm{cm/s^2}$ (arba lg $g_\odot = 4{,}44$), $T_{ef\odot} = 5780$ K.

Ši formulė sieja visus pagrindinius žvaigždės fizinius parametrus. Ypač svarbus parametras yra žvaigždės masė, kurios dydis sąlygoja žvaigždės pradinę padėtį HR diagramos pagrindinėje sekoje ir tolesnę jos raidą. Deja, nėra jokios galimybės nustatyti pavienės žvaigždės masę. Tam reikia žvaigždės traukos veikiamo antro kūno, pavyzdžiui, antros žvaigždės ar planetos. Čia ypač tinka dvinarės žvaigždės, skriejančios aplink bendrą masės centrą. Smulkiau apie tai kalbėsime aptardami dvinares žvaigždes (**5.30** poskyris). Čia tik nurodysime, kad pagrindinė seka HR diagramoje yra kartu ir masių seka (žr. **13**-ąją lentelę knygos pabaigoje). Viršutinėje jos dalyje yra O klasės žvaigždės, kurių masės dešimtis kartų didesnės negu Saulės masė, o raudoniausios M nykštukės turi mases 0,08 $M_\odot$. Didesnei pagrindinės sekos daliai apytikriai galioja proporcingumas tarp bolometrinio šviesio L ir žvaigždės masės: $L \sim M^{3,9}$.

Nei žvaigždės masė, nei jos šviesis neturi tiesioginės įtakos jos paviršiaus spinduliavimo pobūdžiui, bet veikia jį per paviršiaus gravitacijos pagreitį g. Įvairių spektrinių ir šviesio klasių lg g reikšmės pateiktos **12**-oje lentelėje knygos pabaigoje. Mažėjant g, t. y. didėjant žvaigždės spinduliui, retėja žvaigždės atmosfera, mažėja susidūrimų tarp atomų ir jonų, ir tai atsispindi ištisiniame spektre ir spektro linijose. Spektre šie pokyčiai fiksuojami kaip antrojo parametro – šviesio klasės požymiai (išsamiau žr. **5.7** poskyryje).

Vykstant žvaigždės raidai, jos masė labai pamažu kinta, nes dėl ***dalelių vėjo*** (dujų ir elektringųjų dalelių srauto) netenkama nemaža medžiagos. Dalelių vėją sukelia aukšta žvaigždės fotosferos ir aukštesnių jos atmosferos sluoksnių temperatūra ir spindulių slėgis. Dėl to panašios į Saulę žvaigždės per metus netenka tik $10^{-14} M_\odot$, tačiau raudonosios milžinės – jau $10^{-8} M_\odot$, O klasės žvaigždės – 10^{-6}–10^{-7} $M_\odot$. Kadangi raida vyksta 10^6–10^7 metų, tai masės netekimas didelių masių žvaigždėms gali siekti kelias Saulės mases.

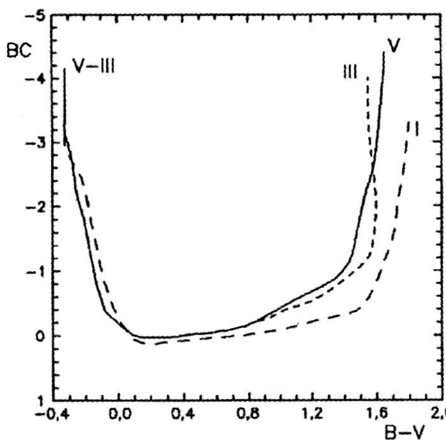
Jei žvaigždės šviesį L išreikšime absoliutiniais bolometriniais ryškiais (formulė **5.19**), tai

$$\lg\,(M/M_\odot) = \lg g - 4\lg T_{\rm ef} - 0{,}4M_{\rm bol} + 12{,}49\,, \qquad (5.33)$$

$$\lg\,(R/R_\odot) = 8{,}46 - 2\lg T_{\rm ef} - 0{,}2M_{\rm bol}. \qquad (5.34)$$

Šios dvi formulės sieja žvaigždžių mases ir spindulius su kitais iš stebėjimų nustatomais parametrais. Absoliutinį bolometrinį ryškį $M_{\rm bol}$ galima lengvai nustatyti iš absoliutinio M_V ryškio, kai žinoma ***bolometrinė pataisa*** *BC* (angl. *bolometric correction*), kuri išreiškiama formule:

$$BC = m_{\rm bol} - V = M_{\rm bol} - M_V = -2{,}5\ \lg \frac{\int_0^\infty J(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J(\lambda)S_V(\lambda)d\lambda} + const. \qquad (5.35)$$

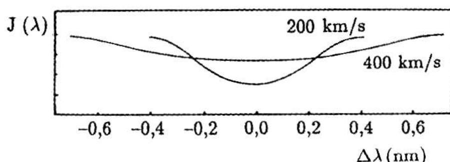


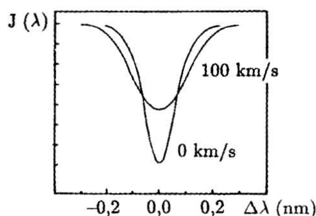
5.24 pav. *Bolometrinių pataisų (BC) priklausomybė nuo B–V spalvos rodiklio V, III ir I šviesio klasių žvaigždėms. Karštų žvaigždžių V–III šviesio klasių BC sutampa*

Priminsime, kad čia $J(\lambda)$ yra žvaigždės spindesio spektrinis tankis (energijos pasiskirstymo spektre kreivė), o S_V yra V ryškio reakcijos kreivė. Bolometrinių pataisų priklausomybė nuo spalvos rodiklio $B–V$ atrodo kaip parabolė su nukreipta žemyn viršūne (**5.24** pav.). Konstanta formulėje (**5.35**) parenkama tokia, kad $BC = 0$ ankstyvųjų A spektrinių poklasių žvaigždėms, kur parabolė turi minimumą. Tuomet panašioms į Saulę žvaigždėms $BC = -0{,}07$. Įvairių spektrinių ir šviesio klasių žvaigždėms bolometrinės pataisos nurodytos **11**-oje lentelėje knygos pabaigoje.

5.10. ŽVAIGŽDŽIŲ AŠINIS SUKIMASIS

Žvaigždžių ašinio sukimosi greitis matuojamas pagal spektro linijų išplitimą dėl Doplerio reiškinio: vienas žvaigždės disko pakraštys artėja į mus, o kitas tolsta. Jei žvaigždė orientuota į mus savo pusiaują, tai artėjimo ir tolimo greičiai maksimalūs. Jei žvaigždė atsukta į mus ašigaliu, jokio sukimosi nepastebime. Visais kitais atvejais matuojama tik greičio dedamoji regėjimo spindulio kryptimi, o tai yra $v \sin i$, kur v – sukimosi greitis, o i – žvaigždės ašies posvyris, t. y. kampas tarp regėjimo spindulio ir sukimosi ašies. **5.25** pav. parodytas spektrinės linijos profilio kitimas didėjant žvaigždės sukimosi greičiui.





5.25 pav. *Sugerties linijos profilio kitimas didėjant žvaigždės ašinio sukimosi greičiui ties pusiauju*

Jeigu žvaigždžių sukimosi ašys yra orientuotos erdvėje chaotiškai, tai pagal $v \sin i$ pasiskirstymą tam tikrai žvaigždžių grupei galima įvertinti tikrąjį žvaigždės sukimosi greitį ties pusiauju

$$\overline{v_{\text{pus}}} = \frac{4}{\pi}\overline{v \sin i}\,. \qquad (5.36)$$

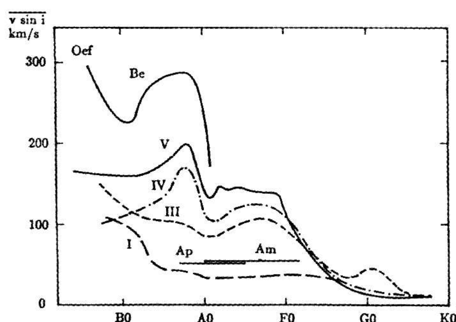
Įvairių klasių žvaigždėms gauti $\overline{v \sin i}$ rezultatai pateikti **5.26** pav. Ma-

tome, kad tarp normalių žvaigždžių didžiausiu greičiu sukasi O–B–A spektrinių klasių V–III šviesio klasių žvaigždės ir O–B1 klasių supermilžinės. Didžiausius iš visų žvaigždžių sukimosi greičius turi Oe ir Be emisinės žvaigždės: jų $\overline{v \sin i}$ yra tarp 220 ir 300 km/s. Taigi jų tikrieji pusiaujiniai greičiai yra artimi 500 km/s, o tai yra beveik kritinis greitis. Taip greitai besisukdama, žvaigždė susiploja per ašigalius, o nuo jos pusiaujo ima atsiskirti dujų diskas arba žiedas. Tai patvirtina emisinių B žvaigždžių stebėjimai, nes kaip tik dujų disko buvimas ir sukelia emisijos linijas.

Prisiminkime, kad spektrinei linijai išplitus dėl Doplerio reiškinio, linijos ekvivalentinis plotis W, t. y. plotas tarp linijos profilio ir interpoliuoto ištisinio spektro lygio, nekinta.

Dideliu greičiu besisukančioje susiplojusios formos žvaigždėje fotosferos temperatūra ir gravitacijos pagreitis paviršiuje priklauso nuo žvaigždės platumos. Ties pusiauju temperatūra ir gravitacija mažiausia, o ties ašigaliu – atvirkščiai. Pavyzdžiui, jei B0 V klasės žvaigždė sukasi greičiu, artimu kritiniam, jos temperatūra ties pusiauju yra 28 000 K, o ties ašigaliais 36 000 K palyginti su T_{ef} = 34 000 K, kai sukimosi nėra. Gravitacijos pagreičio logaritmas yra 3,7 ties pusiauju ir 4,1 ties ašigaliais. Tokie dideli fizinių parametrų skirtumai sukelia stebimųjų žvaigždžių savybių priklausomybę nuo žvaigždės orientacijos. Kintant sukimosi greičiui ir orientacijai, šiek tiek keičiasi energijos pasiskirstymas spektre, Balmerio šuolio aukštis, spektrinių linijų tamsiai ir profiliai, spektrinės klasės, absoliutiniai ryškiai ir kt. Tiesa, šie pakitimai nėra dideli, tačiau jie sukelia stebimą žvaigždžių parametrų dispersiją apie vidutines reikšmes.

Ties F0 spektrine klase V–IV–III šviesio klasių žvaigždžių sukimosi greitis staigiai sumažėja. Palyginę tos pat spektrinės klasės, bet skirtingų amžių žvaigždes, matome, kad kuo žvaigždė senesnė, tuo lėčiau ji sukasi. Saulė priklauso lėtai besisukančioms žvaigždėms – jos pusiaujo greitis tik 2 km/s, be to, apsisukimo periodas priklauso nuo platumos – ties ašigaliais periodas 20% didesnis negu ties pusiauju (žr. **5.33** poskyrį). Be to, apsisukimo periodas dar priklauso ir nuo gylio. Šis reiškinys susijęs su konvekciniu apvalkalu ir yra viena priežasčių, dėl ko Saulės aktyvumas cikliškai kinta. Saulės orbitinė observatorija SOHO nustatė, kad abiejuose Saulės pusrutuliuose yra kelios apie 60 000 km pločio juostos, kurios sukasi ~15 km/val greičiau negu aplinkinės sritys. Šių greičiau besisukančių juostų padėtis nėra



5.26 pav. *Vidutinio sukimosi greičio priklausomybė nuo spektrinės klasės įvairių šviesio klasių ir pekuliariškumų žvaigždėms. Oef yra emisinės O klasės žvaigždės, Be yra emisinės B klasės žvaigždės, Ap ir Am yra pekuliarinės ir metalingosios A klasės žvaigždės*

pastovi. Per 11 metų iš vidutinių platumų jos pamažu juda Saulės pusiaujo link. Saulės dėmės susidaro skirtingo greičio juostų sąlyčio vietose. Visas išorinis Saulės sluoksnis iki 25 000 km gylio nuo pusiaujo lėtai slenka ašigalių link. Dėl to pusiaujo medžiaga maždaug per metus atsiduria ties ašigaliais.

5.11. FOTOMETRINĖ ŽVAIGŽDŽIŲ KLASIFIKACIJA

Jau buvo minėta, kad norint nustatyti žvaigždės spektrinę klasę ir šviesio klasę, reikia pakankamos dispersijos spektrų – ne mažesnės kaip 10 nm/mm. Įvairioms pekuliarinėms žvaigždžių savybėms (cheminės sudėties nevienodumams, sugerties linijų emisinėms dedamosioms, blanketavimo efektams) aptikti dažnai reikia dar didesnės dispersijos. Kuo didesnė spektro dispersija, tuo didesnio skersmens teleskopo arba ilgesnių ekspozicijų reikia spektrui nufotografuoti ar užregistruoti fotoelektriniais prietaisais. Štai kodėl spektrinė klasifikacija MK sistemoje daugiausia apsiriboja 12–13 ryškio žvaigždėmis. Silpnesnių žvaigždžių, klasifikuotų MK sistemoje, yra labai mažai. Norint ištirti Galaktikos struktūrą ir tarpžvaigždinę šviesos ekstinkciją, reikia nustatyti žvaigždžių ryškius, spalvos rodiklius, spektrines klases, šviesio klases (arba absoliutinius ryškius), metalingumus, pekuliariškumus ir kitas fizines savybes tūkstančiams ir dešimtims tūkstančių žvaigždžių.

Šiam tikslui taikoma žvaigždžių fotometrija, naudojant daugiaspalves astrofotometrines sistemas. Trumpai apie tai buvo kalbama **5.4** poskyryje apibrėžiant plačiajuostes, vidurjuostes ir siaurajuostes sistemas.

Plačiajuostės sistemos tinka kaip priedas prie žvaigždžių spektrų: spektrinė klasifikacija duoda spektrines ir šviesio klases, o plačiajuostė fotometrija duoda ryškius, reikalingus nuotoliui nustatyti, ir spalvos rodiklius, reikalingus spalvos ekscesui, t. y. tarpžvaigždiniam parausvėjimui bei tarpžvaigždinei ekstinkcijai nustatyti.

Iš plačiajuosčių sistemų plačiausiai naudojama tarptautinį pripažinimą pelniusi trispalvė *UBV* sistema, aprašyta **5.4** poskyryje. Ši sistema turi tęsinį į raudonąją ir infraraudonąją sritį. Šių papildomų reakcijos kreivių charakteristikos pateiktos **5.2** lentelėje.

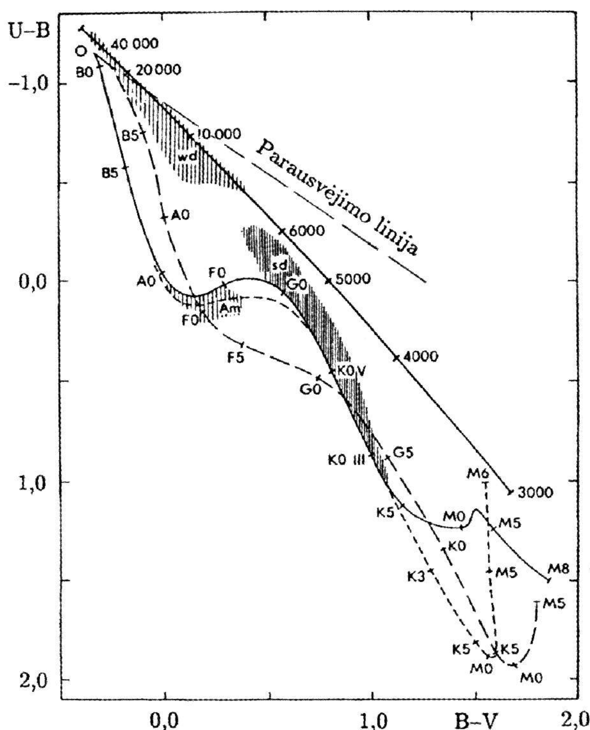
5.2 lentelė. *RIJHKLMNQ* sistemos reakcijos kreivių vidutiniai bangos ilgiai ir puspločiai

Juosta	*R*	*I*	*J*	*H*	*K*	*L*	*M*	*N*	*Q*
λ_0 (μm)	0,71	0,97	1,25	1,62	2,2	3,5	5,0	10,4	20,0
$\Delta\lambda$ (μm)	0,21	0,22	0,3	0,2	0,6	0,9	1,1	6,0	5,5

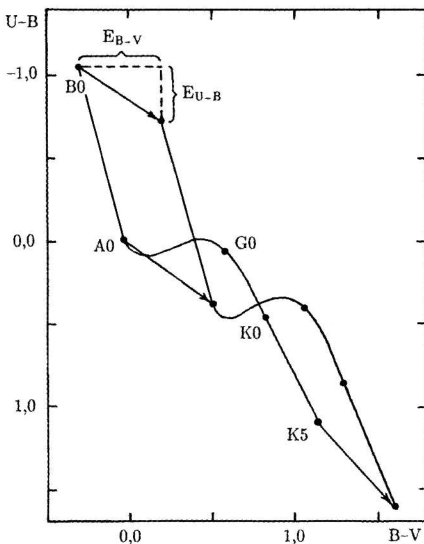
Šios sistemos juostos parinktos taip, kad sutaptų su Žemės atmosferos vandens garų pralaidumo langais infraraudonojoje spektro srityje. Nuo 22 μm iki 1 mm elektromagnetines bangas visiškai sugeria vandens garai, ir Žemės

paviršiaus jūros lygyje jos nepasiekia. Tai pasakytina ir apie ultravioletinius spindulius, trumpesnius negu 300 nm, ir apie Rentgeno bei gama spindulius, kuriuos sugeria atmosferos deguonis, ozonas ir azotas.

Iš žvaigždžių matavimų dvylikaspalvėje sistemoje *UBVRIJHKLMNQ* galima gauti apytikslį energijos pasiskirstymą žvaigždės spektre. Spalvos rodikliai *B–V*, *V–R*, *R–I* ir kiti, į kuriuos įeina ilgabangiai ryškiai, mažai paveikti spektro sugerties linijų, leidžia įvertinti žvaigždės fotosferos temperatūrą. Tiesa, tam reikia žinoti tarpžvaigždinį parausvėjimą ir šviesio klasę. Pagal spalvos rodiklį *U–B* galima įvertinti Balmerio šuolio aukštį, kuris B klasės žvaigždėms yra šviesio funkcija. Ypač naudinga ir plačiai taikoma *U–B*, *B–V* diagrama (**5.27** pav.), kurioje įvairių šviesio klasių žvaigždės išsidėsto į šiek tiek skirtingas sekas. Pagrindinės sekos vingį sukelia Balmerio šuolio aukščio kitimas: šuolio aukštėjimas B žvaigždėse ir žemėjimas A–F žvaigždėse. **5.27** pav. parodytos diagramos sritys, kuriose aptinkamos baltosios nykštukės (wd), F–G



5.27 pav. *Dviejų spalvos rodiklių U–B, B–V diagrama, kurioje parodytos įvairių šviesio klasių sekos: plona ištisinė linija – V klasės arba pagrindinė seka, trumpų brūkšnių linija – III klasės arba milžinių seka ir ilgų brūkšnių linija – I klasės arba supermilžinių seka. Užbrūkšniuotos baltųjų nykštukių (wd), metalingųjų žvaigždžių (Am) ir subnykštukių (sd) užimamos sritys. Stora ištisinė linija su temperatūrų atžymomis – idealiųjų spinduolių seka. Brūkšniuota tiesė – O klasės žvaigždžių tarpžvaigždinio parausvėjimo linija*



5.28 pav. *U–B, B–V diagrama. Matome, kaip dėl tarpžvaigždinio parausvėjimo (atsiradus spalvos ekscesams* E_{U-B} *ir* E_{B-V}*) pasislenka pagrindinė seka*

spektrinių klasių subnykštukės (sd) ir metalingosios žvaigždės (Am). Jeigu žvaigždės nebūtų paveiktos tarpžvaigždinio parausvėjimo, pagal *U–B, B–V* diagramą būtų galima bent apytiksliai nustatyti jų spektrines ir šviesio klases, taip pat aptikti subnykštukes ir baltąsias nykštukes. Aišku, tose vietose, kur įvairaus šviesio žvaigždžių linijos eina arti, kertasi ar sutampa, šviesio klasės įvertinti neįmanoma.

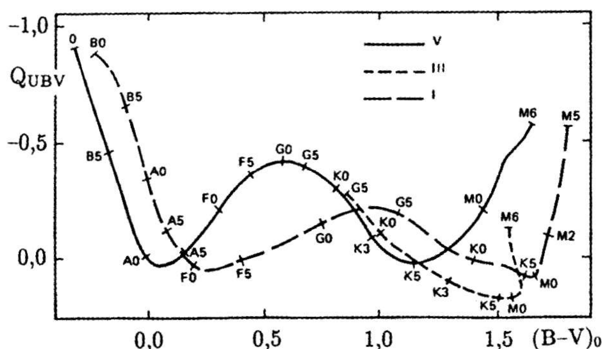
Dar daugiau neapibrėžtumo kelia tarpžvaigždinis parausvėjimas, kuris prie abiejų spalvos rodiklių prideda spalvos ekscesus E_{U-B} ir E_{B-V}. Konkrečiai žvaigždei šie abu ekscesai visada yra proporcingi:

$$E_{U-B} = rE_{B-V} + sE_{B-V}^2 ; \quad (\mathbf{5.37})$$

čia r kinta nuo 0,7 O–B–A žvaigždėms iki 1,1 M žvaigždėms, o s = 0,05 (beveik pastovus). *U–B, B–V* diagramoje ši lygtis yra parabolė, labai artima tiesei. **5.27** pav. parausvėjimo linija O klasės žvaigždėms parodyta ilgabrūkšne linija. Didėjant tarpžvaigždiniam parausvėjimui, O klasės žvaigždės slenka į dešinę ir žemyn išilgai šios linijos. Kitų spektrinių klasių žvaigždės slenka iš savo normalios vietos maždaug lygiagrečiai parodytai parausvėjimo linijai. Jei *U–B*, *B–V* diagramoje atidėsime kokio nors žvaigždžių spiečiaus pagrindinę seką ir imsime prieš tą spiečių didinti tarpžvaigždinių dulkių kiekį, visa pagrindinė seka slinks išilgai parausvėjimo linijų į dešinę ir žemyn, kaip parodyta **5.28** pav. Tiesa, kadangi įvairių spektrinių klasių parausvėjimo linijos eina šiek tiek skirtingais kampais, esant dideliam poslinkiui pagrindinė seka truputį deformuojasi. Iš pagrindinės sekos poslinkio galima nustatyti žvaigždžių spiečių spalvos ekscesus. Tačiau netgi tarpžvaigždinio parausvėjimo sąlygomis *U–B*, *B–V* diagrama lieka naudinga žvaigždžių klasifikacijos tikslams dėl labai svarbaus fotometrinio parametro

$$Q_{UBV} = U - B - (E_{U-B} / E_{B-V})\,(B - V)\,, \quad (\mathbf{5.38})$$

kuris nuo tarpžvaigždinio parausvėjimo nepriklauso. Šis Q parametras gali būti apskaičiuotas įvairių spektrinių tipų žvaigždėms ir atidėtas Q_{UBV}, $(B–V)_0$ diagramoje (**5.29** pav.). Čia $(B–V)_0$ yra konkrečią spektrinę klasę atitinkantis tikrasis spalvos rodiklis. Šioje diagramoje parausvėjimo linijos eina horizontaliai, ir didėjant tarpžvaigždiniam parausvėjimui žvaigždės slenka tik į dešinę kirsdamos kelių šviesio klasių sekas. Turint papildomos informacijos apie žvaigždės

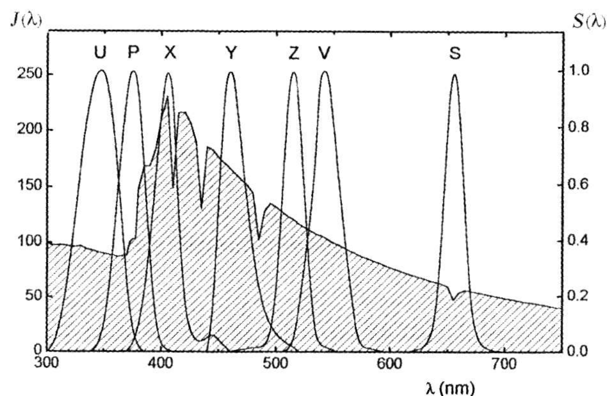


5.29 pav. *Nepriklausantis nuo tarpžvaigždinio parausvėjimo parametras Q, atidėtas kaip tikrojo spalvos rodiklio* $(B-V)_0$ *funkcija trijų šviesio klasių (V, III ir I) žvaigždėms*

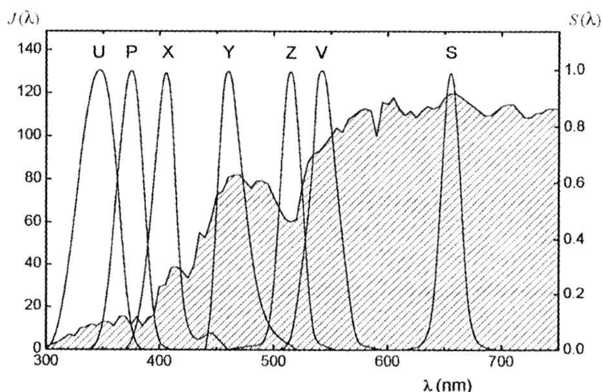
šviesio klasę iš spektrų, šią diagramą galima panaudoti tikslioms spektrinėms klasėms ir spalvos ekscesams nustatyti.

Vidurjuostės fotometrinės sistemos dėl siauresnių reakcijos kreivių yra mažesnio skvarbumo, t. y. jose sunkiau išmatuoti silpnesnes žvaigždes. Tačiau, taikant šias sistemas, galima gauti daugiau informacijos apie žvaigždžių fizines savybes. Plačiausiai naudojamos pasaulyje yra Bengto Striomgreno (*B. Strömgren*) sistema *uvby* su vidutiniais bangų ilgiais 350, 411, 467 ir 547 nm, Ženevos sistema $UB_1B_2V_1VG$ su vidutiniais bangų ilgiais 346, 402, 448, 540, 550 ir 580 nm ir Vilniaus sistema *UPXYZVS* su vidutiniais bangų ilgiais 345, 374, 405, 466, 516, 544 ir 656 nm. Optimaliausia žvaigždžių fotometrinei klasifikacijai yra Vilniaus sistema, suteikianti galimybę klasifikuoti bet kokią žvaigždę tik iš jos septyniaspalvės fotometrijos duomenų panaudojant nepriklausomus nuo tarpžvaigždinio parausvėjimo parametrus

$$Q_{m_1m_2m_3} = (m_1 - m_2) - (E_{m_1-m_2} / E_{m_2-m_3})\,(m_2 - m_3)\,, \qquad (5.39)$$

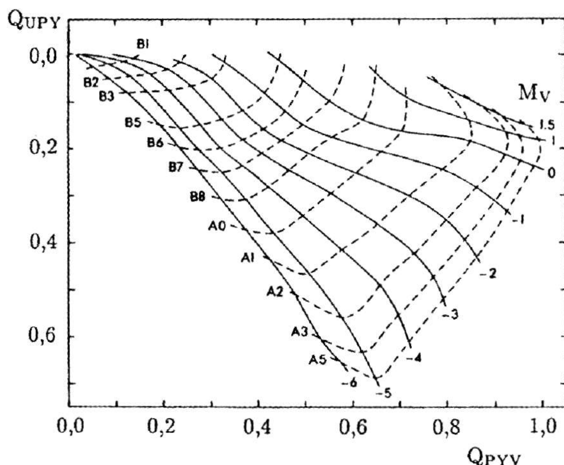


5.30 pav. *A0 V klasės žvaigždės energijos pasiskirstymo kreivė su Vilniaus fotometrinės sistemos juostų padėtimis*



5.31 pav. *K5 V klasės žvaigždės energijos pasiskirstymo kreivė su Vilniaus fotometrinės sistemos juostų padėtimis*

panašius į Q_{UBV}. Vilniaus sistemos juostos specialiai parinktos tokiose spektro vietose, kur susikaupusios spektro linijos ar šuoliai, jautrūs fizinėms žvaigždžių savybėms (**5.30** ir **5.31** pav.). *U* reakcijos kreivė yra ultravioletinėje srityje už Balmerio šuolio. Šio ryškio ir ryškio *X*, kurio reakcijos kreivė yra violetinėje srityje prieš šuolį, skirtumas rodo Balmerio šuolio aukštį. *P* reakcijos kreivė ties 374 nm yra ant Balmerio linijų sankaupos ties jos riba, ir todėl šis ryškis yra labai jautrus B–A–F žvaigždžių šviesio kriterijus. *Y* reakcijos kreivė yra toje spektro vietoje, kur tarpžvaigždinis parausvėjimas labiausiai skiriasi nuo žvaigždės rausvėjimo žemėjant temperatūrai. *Z* reakcijos kreivė sutampa su Mg I tripleto linijų ir magnio hidrido (MgH) molekulinės juostos sudaryta



5.32 pav. *Vilniaus fotometrinės sistemos diagrama Q_{UPY}, Q_{PYV}, skirta B spektrinės klasės žvaigždėms klasifikuoti. Ištisinės linijos žymi vienodo absoliutinio ryškio sekas, brūkšniuotos linijos – vienodų spektrinių poklasių sekas*

gilia sugerties depresija, todėl *Z* ryškis yra labai jautrus G–K–M žvaigždžių šviesiui. *V* reakcijos kreivės padėtis beveik sutampa su *UBV* sistemos *V* ryškio vidutiniu bangos ilgiu, todėl šis ryškis duoda galimybę susieti abiejų sistemų matavimų duomenis. *S* reakcijos kreivė yra ant vandenilio Hα linijos ir teikia informacijos apie tai, ar ji yra sugertinė, ar emisinė.

Žvaigždžių klasifikacijai Vilniaus sistemoje naudojamos dviejų $Q_{m_1 m_2 m_3}$ parametrų diagramos, kalibruotos spektrinėmis klasėmis ir absoliutiniais ryškiais. **5.32** pav. parodyta viena tokių diagramų, skirta B spektrinės klasės žvaigždėms klasifikuoti. Septyniose spektro juostose išmatavus žvaigždės ryškius, galima apskaičiuoti įvairius parametrus, o iš jų įvairių kombinacijų – nustatyti žvaigždžių spektrines klases (arba temperatūras), absoliutinius ryškius (arba gravitacijos pagreičius) ir tarpžvaigždinį parausvėjimą. Sistema taip pat leidžia aptikti įvairių tipų pekuliarines žvaigždes – subnykštukes, nemetalingąsias milžines ir submilžines, B ir A žvaigždes su cheminės sudėties anomalijomis, baltąsias nykštukes, anglingąsias ir baringąsias žvaigždes, emisines žvaigždes, įvairių rūšių vizualiai neišskiriamas dvinares žvaigždes. Vilniaus sistema yra vienintelė pasaulyje, kuria naudojantis galima suklasifikuoti bet kokį žvaigždžių rinkinį.

5.12. ŽVAIGŽDŽIŲ VIDINĖ SANDARA

Stebėjimams prieinamos tik žvaigždžių fotosferos ir virš jų esantys sluoksniai, o duomenis apie žvaigždžių gelmes turime gauti grynai teoriškai. Jau šio skyriaus pradžioje minėjome, kad dujų kamuolyje turi būti hidrostatinė pusiausvyra, t. y. visos jėgos, veikiančios bet kurį mažą žvaigždės tūrio elementą, turi būti atsvertos. Gravitacijos jėgų veikiamas dujų rutulys stengiasi susitraukti, sukristi į centrą. Jam priešinasi dujų slėgio gradiento ir spindulių srauto slėgio jėgos, kurios nukreiptos į išorę ir stengiasi dujų rutulį išplėsti ir išsklaidyti. Slėgio pokytis dP storio dr dujų sluoksnelyje yra

$$dP = -g\rho\, dr; \qquad \textbf{(5.40)}$$

čia g – gravitacijos pagreitis ir ρ – dujų tankis nuotolyje r nuo centro. Ši lygtis vadinama ***hidrostatinės pusiausvyros lygtimi.*** Ji leidžia rasti slėgio kitimą nuo žvaigždės paviršiaus iki centro, kai žinoma $g(r)$ ir $\rho\,(r)$. Sluoksnio tankį ρ galima apskaičiuoti pagal idealiųjų dujų Klapeirono lygtį žinant dujų slėgį P_d ir temperatūrą T šiame sluoksnyje:

$$P_d = \rho \mathcal{R} T / \mu\,; \qquad \textbf{(5.41)}$$

čia $\mathcal{R}$ – universalioji dujų konstanta, o μ – vidutinė atominė masė, tenkanti vienai plazmos dalelei (įskaitant branduolius ir laisvuosius elektronus) ir priklausanti nuo sluoksnio cheminės sudėties ir jonizacijos būvio. Ją galima apskaičiuoti iš formulės

$$\mu = \frac{1}{2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z}, \qquad (5.42)$$

kuri tinka visos jonizacijos atveju. Čia X, Y ir Z yra vandenilio, helio ir sunkesniųjų elementų santykinė gausa pagal masę ($X + Y + Z = 1$) Saulės atveju $X = 0{,}747$, $Y = 0{,}237$, $Z = 0{,}016$ ir $\mu = 0{,}6$ protono masės. Smulkiau apie cheminių elementų gausą ir jos matematinę išraišką žr. **5.24** poskyryje.

Artėjant prie žvaigždžių centrų, vis svarbesnį vaidmenį ima vaidinti elektromagnetinių spindulių srauto slėgis:

$$P_s = \frac{4\sigma T^4}{3c}; \qquad (5.43)$$

čia σ – Stefano ir Bolcmano konstanta, c – šviesos greitis vakuume.

Gravitacijos pagreitis sluoksnyje g gali būti apskaičiuotas pagal formulę

$$g = G\frac{M(r)}{r^2}; \qquad (5.44)$$

čia $M(r)$ – žvaigždės masės dalis sluoksnio vidinėje pusėje, G – gravitacijos konstanta, r – sluoksnio nuotolis nuo žvaigždės centro. $M(r)$ savo ruožtu gali būti apskaičiuota iš ρ (r) funkcijos, t. y.

$$M(r) = 4\pi\int_0^r \rho\, r^2\, dr. \qquad (5.45)$$

Įrašę į hidrostatinės pusiausvyros lygtį (**5.40**) jos atskirų narių išraiškas, gauname:

$$d\left(\frac{\mathcal{R}T\rho}{\mu} + \frac{4\sigma T^4}{3c}\right) = -4\pi G\rho\frac{\int_0^r \rho r^2 dr}{r^2}dr \cdot \qquad (5.46)$$

Tai yra detali hidrostatinės pusiausvyros lygtis.

Žvaigždės gelmėse branduolinių reakcijų išskirta energija tiesiogiai į erdvę neištrūksta (išskyrus keletą procentų, kuriuos nekliudomai išneša neutrinai). Elektromagnetiniai spinduliai, praėję kelis milimetrus ar centimetrus, vėl sugeriami ir išspinduliuojami visomis kryptimis, taip pat išsklaidomi į šalis pakeliui sutiktų atomų branduolių, jonų, atomų ir elektronų. Taigi energija į viršų sklinda labai laužyta trajektorija, pakeliui į paviršių užtrukdama kelis milijonus metų. Taip aukštesni žvaigždės sluoksniai lyg antklodė neleidžia ataušti gilesniems sluoksniams.

Kai kuriais atvejais (per didelis energijos srautas, per didelis sugerties koeficientas) spinduliai nesuspėja pernešti ateinančio iš centro energijos srauto. Tada prasideda ***konvekcija*** – vienos, karštesnės, dujų srovės kyla aukštyn, kitos, vėsesnės, leidžiasi žemyn. Beveik visų rūšių žvaigždės greta spindulinių turi ir konvekcines zonas.

Kiekvieno žvaigždės sluoksnio temperatūra priklauso nuo to, kaip energija atsiranda ir kokiu būdu bei greičiu pernešama. Tai nusakoma vadinamąja ***termodinaminės pusiausvyros lygtimi.*** Kai energija pernešama spinduliais, galioja lygtis:

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{16\sigma}\frac{\kappa\rho}{T^3}\frac{\int_0^r \rho\varepsilon r^2 dr}{r^2}; \qquad (5.47)$$

čia κ yra žvaigždės masės vieneto sugerties koeficientas (cm^2/g), ε – energijos gamybos greitis (J/g·s), σ – Stefano ir Bolcmano konstanta. Žinomi du procesai, kurie turi įtakos κ didumui: tikroji sugertis, kai fotonas dingsta ir jo energija pereina į šiluminę, ir fotonų sklaida, kai fotonas tik nukreipiamas nuo buvusios krypties. Aišku, kad κ priklauso nuo spindulių dažnio ar bangos ilgio.

Kai energija pernešama konvekcijos būdu žvaigždės vidinėje arba išorinėje konvekcijos zonoje, termodinaminės pusiausvyros lygtis yra daug sudėtingesnė. Realiai ir konvekcinėje zonoje vyksta spindulinė energijos pernaša, tik kiekvienas spinduliuojantis vienetinis dujų tūris, sugėręs energiją, prieš tą energiją vėl išspinduliuodamas, pasislenka tam tikru atstumu *l*. Šis atstumas *l* vadinamas ***maišymosi ilgiu*** (angl. *mixing length*).

Palyginę iš Klapeirono lygties (5.41) gautą dujų slėgį žvaigždės centre ir vienetinio ploto dujų stulpelio svorį per visą žvaigždės spindulį, galime gauti apytikslę formulę apskaičiuoti temperatūrai milijonais kelvinų bet kokios masės žvaigždės centre:

$$T_c = \frac{\mu G M}{\mathcal{R} R} \approx 14\left(\frac{M}{M_\odot}\right)\left(\frac{R}{R_\odot}\right). \qquad (5.48)$$

Čia R – visos žvaigždės spindulys, G ir $\mathcal{R}$ – gravitacijos ir universalioji dujų konstantos.

Visa energija, kurią per laiko vienetą išspinduliuoja žvaigždės dalis, telpanti r spindulio rutulyje, yra šitokia:

$$L_r = 4\pi\int_0^r \rho\varepsilon r^2\, dr, \qquad (5.49)$$

o visos žvaigždės spinduliavimo galia (šviesis) yra

$$L = 4\pi\int_0^R \rho\varepsilon r^2\, dr. \qquad (5.50)$$

Apytikslę L reikšmę galima rasti iš formulės:

$$L = \frac{16\pi^2\sigma G}{9\mathcal{R}^4}\frac{\mu^4}{\kappa}M^3, \qquad (5.51)$$

arba

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 860\frac{\mu^4}{\kappa}\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^3, \qquad (5.52)$$

o tai yra teorinė masės ir šviesio sąryšio išraiška.

Naudojantis šiomis lygtimis, priartėjimų metodu galima apskaičiuoti bet kokios ***žvaigždės modelį,*** t. y. lentelę, kaip kinta su nuotoliu nuo centro keturi parametrai: $P(r)$, $T(r)$, $L(r)$ ir $M(r)$ arba $g(r)$. Lygčių sprendimas paprastai pradedamas žvaigždės paviršiuje, kur fiziniai parametrai yra žinomi iš stebėjimų. Visi parametrai nuosekliai skaičiuojami ploniems sluoksniams, einant nuo paviršiaus centro kryptimi. Taip žingsnis po žingsnio slėgis, temperatūra, šviesis ir masė randami vis gilesniems sluoksniams, kol pasiekiamas žvaigždės centras. Jei, pasiekus žvaigždės centrą, masė ir šviesis nevirsta nuliais, keičiamas sugerties koeficientas κ, energijos gamybos greitis ε, pradinė cheminė sudėtis X, Y, Z, ir skaičiavimai kartojami. Kartais skaičiuojama atvirkščia kryptimi – nuo centro į išorę. Apskaičiuoti žvaigždės modelį yra sudėtingas, daug darbo reikalaujantis procesas. Iki 1950 m. apskaičiuoti vieną modelį trukdavo metus. Dabar sparčiai veikiančiais kompiuteriais tai atliekama per kelias minutes.

Tokie modeliai gali būti apskaičiuoti įvairiems laiko momentams nuo žvaigždės raidos pradžios, t. y. nuo to laiko, kai joje įsižiebia branduolinės reakcijos. Šios reakcijos ne tik teikia žvaigždei energiją, bet ir keičia jos gelmių cheminę sudėtį. Dėl to kinta reakcijų pobūdis ir energijos gamybos greitis. Tai sukelia aukštesnių žvaigždės sluoksnių slėgio, temperatūros, šviesio ir tankio pokyčius, taigi ir visos žvaigždės L ir T_{ef}. Dėl to žvaigždės modelis ilgainiui kinta, evoliucionuoja. Žvaigždės šviesį ir temperatūrą įvairiais laiko momentais galima atidėti HR diagramoje. Sujungus žvaigždės taškus, kuriuos atitinka įvairūs laiko momentai, gaunamas jos raidos takas.

5.13. ŽVAIGŽDŽIŲ ATMOSFERŲ MODELIAI

Žvaigždės atmosfera laikomi tie jos išoriniai sluoksniai, kuriuose susidaro elektromagnetiniai spinduliai, tiesiogiai skleidžiami į kosminę erdvę. Tai ***fotosfera, chromosfera ir vainikas.*** Fotosfera yra giliausias atmosferos sluoksnis, panašiose į Saulę žvaigždėse siekiantis 300–500 km storį. Milžinių ir supermilžinių fotosferos esti 100–1000 kartų storesnės, nes fotosferos storis kinta atvirkščiai proporcingai gravitacijos pagreičio dydžiui žvaigždės paviršiuje. Saulės atveju fotosfera yra matomasis spindintis jos paviršius, kurio tankis einant gilyn greitai didėja, paslėpdamas gilesnius sluoksnius. Ties Saulės fotosferos vidine riba temperatūra yra 8000 K, o ties išorine riba – 4500 K. Saulės disko pakraštyje regėjimo spindulys niekada nekerta gilesnių fotosfe-

ros sluoksnių. Taigi ties disko kraštu (limbu) mes matome tik išorinius, vėsesnius fotosferos sluoksnius, kurie yra tamsesni. Šis reiškinys vadinamas ***limbo patamsėjimu***.

Fotosferoje susidaro ir žvaigždės ištisinis spektras, ir spektrinės sugerties linijos. Norint interpretuoti energijos pasiskirstymą žvaigždžių spektruose ir spektro linijų matomumą, reikia apskaičiuoti teorinį žvaigždės fotosferos (arba visos atmosferos) modelį, o po to gauti ir sintetinį šio modelio spektrą. ***Atmosferos modeliai*** duoda slėgio, temperatūros, tankio, jonizacijos laipsnio ir sužadinimo laipsnio priklausomybę nuo gylio. Prieš skaičiuojant reikia priimti tam tikrą atmosferos cheminę sudėtį, gravitacijos pagreitį paviršiuje g ir energijos srauto iš gilumininių žvaigždės sluoksnių stiprumą (arba jam ekvivalentinį parametrą – efektinę temperatūrą T_{ef}). Skaičiuojant atmosferos modelį, sprendžiamos dvi diferencialinės lygtys – hidrostatinės pusiausvyros lygtis, kuri apibrėžia slėgio pasiskirstymą, ir spindulinio energijos pernešimo lygtis, kuri apibrėžia temperatūros pasiskirstymą.

Fiziniai atmosferos parametrai paprastai nustatomi ne kaip geometrinio gylio, bet kaip ***optinio gylio*** τ funkcija. Elektromagnetiniai spinduliai, praėję ploną sluoksnį, kurio storis dr, susilpnėja dydžiu $d\tau_\nu$:

$$d\tau_\nu = -\kappa_\nu \rho \, dr . \qquad (5.53)$$

Čia κ_ν yra medžiagos sugerties koeficientas, aptartas praeitame poskyryje, ρ – dujų tankis, o τ_ν – optinis gylis dažnio ν fotonams. Jei fotonai praeina sluoksnį, kurio storis r, tai spindulių susilpnėjimas yra:

$$\tau_\nu = -\int_0^r \kappa_\nu \rho \, dr . \qquad (5.54)$$

Optiniam gyliui matuoti paprastai imamas ne τ_ν, bet τ, apskaičiuotas vidutinei κ reikšmei, atitinkančiai ištisinį spektrą ties 500 nm. Jei $\tau = 1$, pro šį sluoksnį praeina e kartų susilpninti spinduliai, t. y. $1/e \approx 0{,}37$ jų dalis. Geometrinis gylis yra maždaug tiesiog proporcingas optinio gylio logaritmui. Reikia prisiminti, kad r didėja einant į žvaigždės išorę, o τ didėja einant gilyn.

Slėgio kitimą, didėjant optiniam gyliui, galima rasti iš ***hidrostatinės pusiausvyros lygties***, kurią gauname sujungę (**5.40**) ir (**5.53**) lygtis:

$$\frac{dP}{d\tau_\nu} = \frac{g}{\kappa_\nu} . \qquad (5.55)$$

Slėgį ir temperatūrą sieja idealiųjų dujų Klapeirono lygtis (**5.41**). Slėgį fotosferoje sudaro trys dedamosios: ***dujų***, ***elektronų*** ir ***spindulių slėgiai***. Fotosferos lygyje, kuriame optinis tankis $\tau = 1$, dujų slėgis didesnis už elektronų slėgį bent 1000 kartų. Elektronų slėgio įtaka didėja karštų žvaigždžių fotosferose, taip pat vėsių žvaigždžių fotosferų gilesniuose sluoksniuose, kur aukštesnė temperatūra ir visuotinesnė jonizacija (daugiau laisvų elektronų). Taip pat elektronų skaičius fotosferoje priklauso nuo jų donorų – metalų atomų gausos. Karštų žvaigždžių,

ypač supermilžinių fotosferose, kur atmosfera reta ir dujų slėgis mažas, labai padidėja spindulių slėgio įtaka.

Kiekvienas žvaigždės fotosferos tūris turi būti ***termodinaminėje pusiausvyroje***, t. y. energijos srautas, srūvantis į tą tūrį, turi būti lygus energijos srautui, kurio tas tūris netenka. Įeinančios ir išeinančios energijos srautus aprašo energijos pernašos lygtis. Priminsime, kad energijos pernaša fotosferose vyksta beveik vien tik spinduliniu būdu, nes konvekcija, esant mažam dujų tankiui, nėra svarbi.

Panagrinėkime, kaip vyksta spindulinė energijos pernaša fotosferoje. Per mažo storio dr fotosferos sluoksnį praeinantis spindulinės energijos srautas I_ν susilpnėja šitaip:

$$dI'_\nu = -\kappa_\nu \rho I_\nu \, dr \,. \qquad (5.56)$$

Sujungę (5.56) ir (5.53) lygtis, gauname diferencialinę ***spindulinės pernašos lygtį***:

$$dI'_\nu = -I_\nu \, d\tau_\nu \,, \qquad (5.57)$$

kurios sprendinys

$$I'_\nu = I^0_\nu e^{-\tau_\nu} \qquad (5.58)$$

yra žinomas eksponentinis energijos silpnėjimo dėsnis spinduliams praeinant pro sugeriančią ar sklaidančią aplinką.

Tačiau (5.58) formulė galioja tik šaltoje aplinkoje, pro kurią sklindantys spinduliai tik sugeriami. Žvaigždžių fotosferose temperatūra yra pakankamai aukšta, todėl tikėtina, kad greta sugerties bet kokiame dujų tūryje bus ir fotonų emisija:

$$dI''_\nu = j_\nu \rho \, dr \,; \qquad (5.59)$$

čia j_ν yra emisijos koeficientas. Tuomet spindulinės pernašos lygtis atrodys taip:

$$dI_\nu = dI'_\nu + dI''_\nu = -\kappa_\nu \rho I_\nu \, dr + j_\nu \rho \, dr \,. \qquad (5.60)$$

Įvedę optinį gylį $d\tau_\nu$ iš (5.53) ir pažymėję

$$S_\nu = \frac{j_\nu}{\kappa_\nu} \,, \qquad (5.61)$$

gauname ***visą spindulinės pernašos lygtį***:

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu \,. \qquad (5.62)$$

Emisijos ir sugerties koeficientų santykis S_ν vadinamas ***energijos šaltinio funkcija***.

Lygties (5.62) sprendinys yra

$$I_\nu(\tau_\nu) = I^0_\nu e^{-\tau_\nu} + \int_0^{\tau_\nu} S_\nu(t_\nu)\, e^{-(\tau_\nu - t_\nu)} \, dt_\nu \,. \qquad (5.63)$$

Čia τ_ν arba jo dalis t_ν yra integravimo kintamasis dydis. Pirmasis formulės (5.63) narys sutampa su (5.58) sprendiniu, o antrasis narys yra optiniame gylyje t_ν

išspinduliuota energija, kurios dalis sugeriama $\tau_\nu - t_\nu$ storio sluoksnyje. Abu energijos srautai – pirminis srautas I_ν ir pakeliui išspinduliuotas antrinis srautas S_ν – iš optinio gylio τ_ν pasiekia fotosferos paviršių, kuriame $\tau_\nu = 0$. Tačiau abu jie būna paveikti skirtingos sugerties, nes nueina skirtingo ilgio kelią sugeriančioje aplinkoje.

5.14. SINTETINIS SPEKTRAS

Naudojantis atmosferos modeliu, galima apskaičiuoti bet kokios žvaigždės ***sintetinį spektrą***. Tam reikia žinoti visus sugerties žvaigždės atmosferoje procesus. Tie procesai yra šie:

1) vandenilio ir kitų elementų atomų pakopiniai šuoliai į aukštesnius energijos lygmenis, duodantys sugerties linijas, 2) vandenilio ir kitų elementų fotojonizacija, duodanti ištisinę sugertį nuo atitinkamos linijų serijos ribos trumpųjų bangų link (pvz., Laimano, Balmerio, Pašeno ir kt. šuoliai), 3) vandenilio neigiamo jono H^- fotojonizacija, duodanti ištisinę sugertį nuo 300 iki 1600 nm su maksimumu ties 800–900 nm, 4) šviesos sklaida laisvaisiais elektronais, kurios įtaka didėja mažėjant tankiui ir didėjant temperatūrai; dėl šios sklaidos fotonų energija mažai kinta, bet ilgėja fotono kelias ir todėl didėja sugerties tikimybė, 5) laisvųjų elektronų šuoliai, kurių metu pralenkiantis elektronas teigiamo jono (pav., protono) lauke lieka laisvas, bet padidėja jo energija; šių šuolių įtaka stipresnė, kai yra daugiau laisvųjų elektronų ir jonų.

Pirmieji du sugerties procesai labiausiai pasireiškia karštose O–B–A–F spektrinių klasių žvaigždėse. H^- daugiausia susidaro F–G–K spektrinių klasių žvaigždėse, kur yra daug laisvųjų elektronų dėl metalų atomų jonizacijos. Karštesnėse žvaigždėse H^- jonų mažai, nes ten mažai neutralių vandenilio atomų, gebančių prisijungti antrą elektroną. Vėsiausiose žvaigždėse per mažai laisvųjų elektronų, nes dauguma metalų atomų neutralūs. Šviesos sklaida laisvaisiais elektronais stipriausia yra karštose supermilžinėse. Laisvųjų elektronų šuoliai svarbūs O–B žvaigždėse, kur vandenilis jonizuotas.

Atomų sužadinimo ir jonizacijos būklę žvaigždės atmosferoje nusako Bolcmano ir Saha formulės. ***Bolcmano formulė***:

$$\frac{n_i}{n_1} = \frac{g_i}{g_1} e^{-\frac{E_i - E_1}{kT}}, \qquad (5.64)$$

čia n_1 ir n_i – atomų skaičiai pirmajame ir i-ajame lygmenyse, g_1 ir g_i – tų lygmenų statistiniai svoriai (skirtingų galimų būsenų tame energijos lygmenyje skaičiai), E_1 ir E_i – tų lygmenų energijos. ***Saha formulė***:

$$n_e \frac{n^+}{n_1} = 2\frac{g^+}{g_1} \frac{(2\pi\, m\, kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} e^{-\frac{E_j}{kT}}; \qquad (5.65)$$

čia n_1 ir g_1 – neutralių atomų skaičius 1 cm^3 ir jų pagrindinės būsenos statistinis

svoris, n^+ ir g^+ – jonizuotų atomų skaičius 1 cm^3 ir jų pagrindinės būsenos svoris, n_e – laisvųjų elektronų skaičius 1 cm^3, E_j – jonizacijos energija.

Sugertis spektrinėje linijoje susijusi su atomo perėjimu iš vieno diskretinio būvio į kitą. Jei atomas yra i lygmenyje su energija E_i, jis gali pagauti fotoną, kurio energija

$$h\nu_{ik} = E_k - E_i , \quad (5.66)$$

ir peršokti į k lygmenį su energija E_k. Šio proceso tikimybė išreiškiama vadinamuoju ***Einšteino sugerties koeficientu*** B_{ik} . Per vienetinį laiką vienetiniame tūryje sugeriamų fotonų skaičius yra

$$n = N_i B_{ik} n_\nu h\nu_{ik} , \quad (5.67)$$

čia N_i yra i lygmenyje esančių atomų skaičius, n_ν – dažnio ν_{ik} fotonų skaičius vienetiniame tūryje, $h\nu_{ik}$ – fotono energija. Kuo didesnis n, tuo didesnis sugerties linijos tamsis. Kartais šuolio tikimybei įvertinti naudojami vadinamieji ***osciliatorių stipriai*** f_{ik} , kurie šitaip susiję su Einšteino koeficientais:

$$f_{ik} = \frac{3hm_e\nu}{\pi e^2} B_{ik} ; \quad (5.68)$$

čia m_e – elektrono masė, e – jo krūvis.

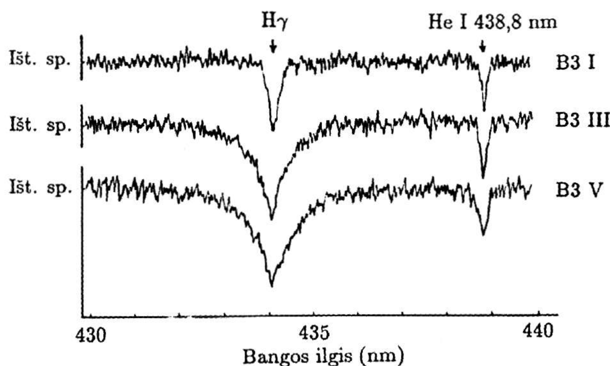
Kadangi kiekvienas energijos lygmuo turi tam tikrą plotį ΔE (nusakomą Heizenbergo neapibrėžtumo sąryšiu tarp lygmens energijos ir sužadinimo trukmės), tai sugeriami fotonai gali būti ne monochromatiniai, o užimti tam tikrą dažnių ar bangų ilgių intervalą, kuris apibrėžia linijos natūralų plotį, ne didesnį negu 0,01 nm. Tačiau iš tikrųjų linijos yra daug platesnės dėl Doplerio ir Štarko reiškinių.

Dėl šiluminių judesių ir dėl turbulentinio judėjimo vieni sugeriantys atomai tolsta nuo žvaigždės centro, kiti tuo pat metu artėja. Dėl skirtingų atomų judėjimo greičių sugeriamas bangos ilgis pasislenka nuo centrinio linijos bangos ilgio dydžiu (***Doplerio reiškinys***)

$$\Delta\lambda = \lambda \frac{v_r}{c} ; \quad (5.69)$$

čia v_r yra radialinis atomo greitis. Kuo didesnė temperatūra, taigi atomų judėjimo greičiai, tuo didesnis linijos išplitimas dėl Doplerio reiškinio. Prie individualių atomų judesių dar prisideda turbulentiniai dujų masių judesiai, kurie ypač juntami vėsių žvaigždžių atmosferose, kurios turi išorinę konvekcinę zoną.

Linijų profiliams dar turi įtakos kiti faktoriai, susiję su atomų energijos lygmenimis. Vienas jų yra slėgio reiškinys, kai atomui susiduriant su pašaline dalele jai perduodama sužadinimo energija. Dėl to atomo sužadintos būsenos vidutinė trukmė sumažėja, taigi padidėja lygmenų (dėl Heizenbergo neapibrėžtumo) ir linijų išplitimas. Ypač didelį poveikį linijos profiliui daro sugeriančių atomų susidūrimai su elektringosiomis dalelėmis (jonais ir laisvaisiais elektronais). Šių dalelių elektros lauke pasislenka atomo energijos lygmenys (***Štarko***

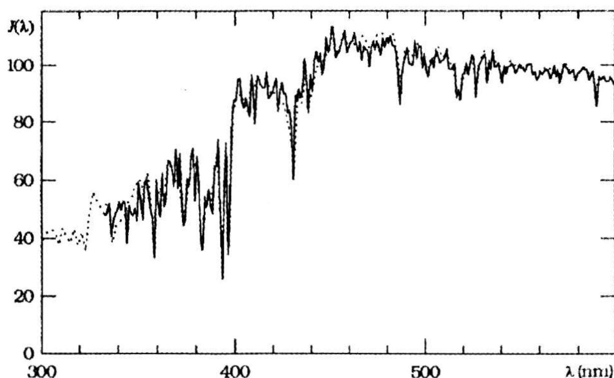


5.33 pav. *Trijų vienodos spektrinės klasės, bet skirtingų šviesio klasių žvaigždžių spektrų registrogramos Hγ linijos aplinkoje. Matyti Štarko reiškinio sukeltas linijos platėjimas mažėjant žvaigždės šviesiui*

reiškinys). Kadangi įvairių atomų lygmenų poslinkis konkrečiu momentu skirtingas, tai sukelia spektrinės linijos išplitimą. Šis reiškinys ypač veikia vandenilio ir šiek tiek mažiau helio linijas. Dėl to vandenilio linijos ypač plačios pagrindinės sekos žvaigždžių spektruose, nes jų atmosferų tankis daug didesnis negu milžinių ar supermilžinių (**5.33** pav.). Ypač stiprus Štarko reiškinys baltosiose nykštukėse, kai vandenilio linijos išplinta tiek, kad jų plotis tarp sparnų galų siekia net 15 nm.

Dėl minėtųjų linijų išplitimo procesų ne tik išplinta linijos, bet kartu ir didėja jų tamsiai arba ekvivalentiniai pločiai, nes susidaro papildoma galimybė fotonų sugerčiai platesniame bangų ilgių ruože. Poskyryje **5.10** minėtas linijų išplitimas dėl ašinio žvaigždės sukimosi taip pat smarkiai išplatina liniją, bet nekeičia jos ekvivalentinio pločio (suminio sugerties kiekio).

Skaičiuojant žvaigždžių sintetinius spektrus jų fotosferų modeliams, turi būti



5.34 pav. *R. Kuruco apskaičiuotas Saulės sintetinis spektras (brūkšninė linija) ir Saulės spektras, gautas iš stebėjimų (ištisinė linija)*

atsižvelgiama į visus procesus, veikiančius tolydinio spektro ir linijų susidarymo mechanizmus. Jei sintetinis spektras pakankamu tikslumu apskaičiuotas kokios nors žvaigždės cheminei sudėčiai, efektinei temperatūrai ir gravitacijos pagreičiui, tai jis turi gerai sutapti su realiu energijos pasiskirstymu žvaigždės spektre, įskaitant visas linijas, jų profilius, tolydinio spektro blanketavimą ir kitas detales.

Bene geriausius pasaulyje žvaigždžių atmosferų modelius ir sintetinius spektrus yra apskaičiavęs Harvardo observatorijos astronomas Robertas Kurucas (*R. Kurucz*) panaudodamas galingus superkompiuterius. Jis įskaitė 60 mln. visų cheminių elementų linijų ir apskaičiavo žvaigždžių modelius ir sintetinius spektrus nuo tolimos ultravioletinės iki tolimos infraraudonosios srities tūkstančiams T_{ef}, $\lg g$, turbulencijos greičio ir cheminės sudėties variantų. **5.34** pav. Kuruco apskaičiuotas Saulės sintetinis spektras palygintas su išmatuota Saulės energijos kreive. Matome, kad abu spektrai puikiai sutampa. Iš sintetinių spektrų galima apskaičiuoti įvairių fotometrinių sistemų spalvos rodiklius ir juos panaudoti tų sistemų kalibracijai. Po tokios kalibracijos fotometrinės sistemos gali būti panaudotos T_{ef}, $\lg g$ ir metalingumo nustatymui bet kurioms žvaigždėms, kurios išmatuotos toje sistemoje.

Žvaigždės chromosfera ir vainikas įneša labai mažą indėlį į bendrą normalios žvaigždės spinduliavimą, todėl energijos pasiskirstymui beveik neturi įtakos. Tačiau kai kurių tipų žvaigždėse chromosfera duoda gana stiprias emisijos linijas. Apie tai plačiau kalbėsime **5.32** poskyryje.

5.15. ŽVAIGŽDŽIŲ SUSIDARYMAS (PIRMASIS RAIDOS ETAPAS)

5.15.1. Bendri žvaigždėdaros bruožai

Žvaigždžių raidos takus HR diagramoje nulemia jų masė ir pradinė cheminė sudėtis, nes nuo to priklauso branduolinių reakcijų tipas ir jų vyksmo greitis. Galima išskirti kelis raidos etapus, apibrėžiamus tam tikrais branduolinių procesų žvaigždžių gelmėse tipais.

Pirmasis raidos etapas – tai žvaigždžių susidarymas (***žvaigždėdara***). Žvaigždės susidaro iš tarpžvaigždinės medžiagos – dujų ir dulkių telkinių dėl gravitacijos jiems traukiantis ir tankėjant. Teoriniai skaičiavimai rodo, kad bet koks medžiagos debesis negali būti vienalytis: jame atsiranda tankio nevienodumų arba gniužulų, kurie tampa kondensacijos centrais. Tokių gniužulų gravitacijos laukas traukia į save aplinkinių debesies dalių medžiagą. Tačiau tam, kad prasidėtų gniužulo traukimasis, reikia, kad debesies viduje gravitacijos jėga būtų didesnė negu dujų slėgio sukeliamas pasipriešinimas, t. y. kad būtų išpildyta ***Džinso gravitacinio nestabilumo sąlyga***. Ši sąlyga apibrėžia gniužulo pradinį spindulį:

$$R \le \frac{4\mu GM}{\mathcal{R}T} = 6{,}5\cdot 10^{17}\frac{\mu}{T}\left(\frac{M}{M_\odot}\right)\text{cm} \approx \frac{0{,}2}{T}\left(\frac{M}{M_\odot}\right)\text{pc}. \quad (5.70)$$

Kadangi tarpžvaigždinių debesų būdinga temperatūra 20 K, tai pavienis Saulės masės gniužulas pradės trauktis būdamas 0,2 pc skersmens, o tai atitinka 10 000 molekulių/cm^3 tankį. Taip tarpžvaigždiniame debesyje susidaro medžiagos gniužulai – ***prožvaigždės***, kurių masės gali būti labai įvairios – nuo keleto iki kelių šimtų Saulės masių, skersmenys – 0,2–10 pc, temperatūros 10–30 K, tankiai apie 10 000 molekulių/cm^3, sudėtis: vandenilio molekulės, vandenilio ir helio atomai, mažas kiekis CO, OH, NH_3, H_2CO ir kitų molekulių, ~1% masės – silikatinės ~100 nm dydžio dulkės.

Gniužului traukiantis, jo gravitacinė potencinė energija virsta kinetine dujų energija, t. y. kyla temperatūra. Tai turi dvi svarbias pasekmes: 1) kylant temperatūrai, didėja slėgis, o tai atsveria gravitacijos jėgą ir sustabdo traukimąsi, 2) temperatūros kilimas prožvaigždės centre sudaro sąlygas įsižiebti branduolinėms reakcijoms.

Įvairių masių prožvaigždžių raida gerokai skiriasi. Dėl šios priežasties jų raidos aprašymą išskirsime į dvi dalis – pirma aprašysime 1 $M_\odot$ masės gniužulo ir prožvaigždės, po to 5–10 $M_\odot$ masės gniužulo ir prožvaigždės raidą. Šie raidos skirtingumai išryškėja vėliau, o iš pradžių visų masių gniužulai elgiasi panašiai.

1. Iš pradžių gniužulo traukimasis vyksta laisvuoju kritimu, t. y. vienintelė veikianti jėga yra gravitacija.

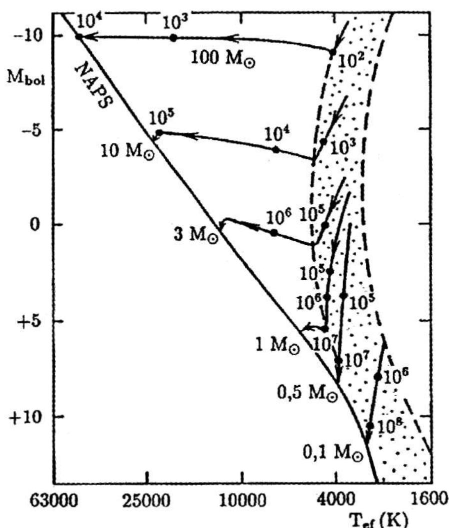
2. Šis procesas vyksta taip, kad centrinėje gniužulo dalyje susidaro didesnio tankio šerdis, pamažu virstanti prožvaigžde, o išorinės gniužulo dalys lieka mažesnio tankio ir sudaro besiformuojančios žvaigždės apvalkalą – ***kokoną***.

3. Kai susidaro šerdis, ji ima traukti į save medžiagą iš apvalkalo ir taip didinti masę. Ilgainiui visas apvalkalas sukrinta į prožvaigždę arba išsisklaido erdvėje.

Turėdami omenyje šiuos faktus, apžvelkime skirtingų masių dujų gniužulų ir prožvaigždžių likimą.

5.15.2. Vienos Saulės masės prožvaigždės

Kad susidarytų vienos Saulės masės prožvaigždė, pradinė gniužulo masė turi būti šiek tiek didesnė, nes dalis gniužulo medžiagos išsisklaido, dalies masės netenkama dėl prožvaigždės skleidžiamo vėjo. Tokiam gniužului besitraukiant, t. y. gravitacinei energijai virstant kinetine, gniužule esančios dulkelės įkaista ir pradeda spinduliuoti infraraudonuosius spindulius, kurie lengvai palieka skaidrų gniužulą, nes jo tankis mažas. Kai per milijoną metų medžiagos tankis padidėja 10–100 kartų, prasideda greitas jos kritimas į centrą (kolapsas), trunkantis 10 000–100 000 m. Gniužulo centre susidaro didesnio



5.35 pav. *Įvairios masės žvaigždžių raidos takai HR diagramoje pirmajame raidos etape. Ant raidos takų pažymėtas laikotarpis metais, praėjęs nuo gravitacinio traukimosi pradžios. NAPS – nulinio amžiaus pagrindinė seka. Taškuotoje diagramos srityje esančiose žvaigždėse energija pernešama konvekcija*

tankio šerdis (vadinama prožvaigžde) ir ją supantis mažesnio tankio apvalkalas. Šerdyje kylanti temperatūra išgarina dulkeles ir paverčia jas dujomis. Kai šerdies temperatūra pasiekia 1800–2000 K, prasideda H_2 disociacija į atomus, po to H atomų jonizacija. Susidariusi plazma palyginti žemoje temperatūroje blogai praleidžia elektromagnetinius spindulius, todėl prožvaigždėje greit pakyla temperatūra bei slėgis, ir jos kolapsas pristabdomas. Tuo laiku prožvaigždės spindulys yra maždaug 80 kartų didesnis negu Saulės.

Prožvaigždė lėtai traukiasi toliau, bet esant blogam skaidrumui išlaisvinama gravitacinė energija sparčiai didina jos gelmių temperatūrą. Padidėjusio energijos srauto į išorę jau nebegali išnešti elektromagnetiniai spinduliai, ir todėl visame jos tūryje prasideda medžiagos konvekcija, t. y. prožvaigždė tarsi „užverda". Tuo laiku prožvaigždės paviršiaus temperatūra pasiekia ~3500 K, ji sužimba keliais ryškiais ir pasirodo HR diagramoje raudonųjų supermilžinių srityje, t. y. tampa žvaigžde. Iki tol didesnė dalis prožvaigždę supusio dujų ir dulkių apvalkalo būna jau sukritusi į žvaigždę, ją supa tik plonas įkaitęs dulkių apvalkalas, skleidžiantis infraraudonuosius spindulius.

Tolesnėje raidoje žvaigždės temperatūra mažai kinta, o dėl jos traukimosi šviesis kinta proporcingai spindulio kvadratui. Dėl to žvaigždė, prieš tai buvusi HR diagramos raudonųjų supermilžinių srityje, ima vertikaliai leistis žemyn, pagrindinės sekos link (**5.35** pav.). Šis vertikalusis žvaigždės slinkimas trunka apie 10 mln. m (1/4 viso prožvaigždės amžiaus). Per tą laiką žvaigždės centre atsiranda zona, kurioje energija pernešama spinduliais. Ta zona vis didėja ir, kai ji apima 3/4 visos masės (o tai atsitinka, kai $T_c \approx 7$ mln. K), šviesis sustoja mažėti, ir žvaigždė pereina į horizontalų raidos taką, kuriame energija žvaigždėje pernešama spinduliais. Tada žvaigždės šviesis beveik nekinta, o didėja paviršiaus temperatūra. Šioje raidos tako dalyje žvaigždė išbūna apie 30 mln. metų. Kai centro temperatūra pasiekia 10 mln. K, ten užsidega vandenilio virtimo heliu branduolinės reakcijos, ir žvaigždė atsiduria ant pagrindinės sekos.

Kai kurios branduolinės reakcijos vyksta dargi anksčiau: D^2 virsta He^3 800 000 K temperatūroje, Li^7 virsta He^4 2,5 mln. K temperatūroje ir Be^9 virsta He^4 3,6 mln. K temperatūroje. Tačiau pradiniai deuterio, ličio ir berilio kiekiai yra labai maži, jie greitai sudega ir didelio poveikio žvaigždės raidai neturi.

Mažesnės už Saulės masę žvaigždės lieka vertikaliajame konvekciniame raidos take iki pat pagrindinės sekos. Apskaičiuota, kad besitraukianti dėl gravitacijos žvaigždė HR diagramoje gali būti tik į kairę nuo beveik vertikalios linijos, kuri vadinama Hajašio (*C. Hayashi* – japonų astronomas) riba. Į dešinę nuo šios ribos žvaigždės yra nestabilios. Jei 1 $M_{\odot}$ žvaigždės raida iki pagrindinės sekos trunka 40 mln. m, tai 0,5 $M_{\odot}$ masės žvaigždei šis laikas yra 200 mln. m, o 0,1 $M_{\odot}$ žvaigždei – 1 mlrd. m. Mažiausios masės žvaigždė, kurioje gali įsižiebti branduolinės reakcijos, yra 0,08 $M_{\odot}$, nes mažesnės masės medžiagos gniužulų centruose temperatūra visada būna žemesnė už 10 mln. K.

5.15.3. Masyvios prožvaigždės

Maždaug 5–10 $M_{\odot}$ būsimoji žvaigždė traukiasi panašiai, bet yra ir skirtumų: 1) branduolinės reakcijos tokioje žvaigždėje prasideda dar prieš tai, kai jos dujų ir dulkių apvalkalas sukrinta į paviršių arba išsisklaido, todėl masyvi tik ką susudariusi žvaigždė net pagrindinėje sekoje matoma tik kaip infraraudonasis objektas, apsuptas dujų ir dulkių „kokono“, 2) masyvios žvaigždės apvalkalas ne visas sukrinta į žvaigždę – didelę jo dalį nupučia į erdvę šviesos slėgis ir elektringųjų dalelių vėjas, 3) masyvios žvaigždės beveik neturi vertikaliosios konvekcinės raidos tako dalies – dėl didelės temperatūros plazma yra skaidri, ir beveik visa energija pernešama į paviršių elektromagnetiniais spinduliais, dėl to žvaigždė HR diagramoje pagrindinės sekos link slenka horizontaliai, 4) masyvių žvaigždžių raidos amžius iki pagrindinės sekos yra daug trumpesnis: 5 $M_{\odot}$ žvaigždei – 600 000 m., 10 $M_{\odot}$ – 100 000 m., 30 $M_{\odot}$ – 30 000 m., 5) dėl didelės paviršiaus temperatūros aplink masyvias žvaigždes susidaro jonizuoto vandenilio (H II) plėtri zona, kuri iš pradžių aptinkama radijo bangomis, o dulkėms išsisklaidžius pasirodo ir regimojoje spektro srityje kaip kompaktiškas emisinis ūkas (žr. **6** skyrių).

Visos traukimosi stadijoje esančios žvaigždės sukasi apie savo ašį. To sukimosi greitis didėja mažėjant spinduliui (judesio kiekio momento tvermė). Šis greitis gali tapti toks didelis, kad nuo gniužulo pusiaujo gali atsiskirti medžiagos žiedas, būsimosios planetų sistemos užuomazga. Jei sukimosi greitis dar didesnis, tai gniužulas gali suskilti į du ar kelis gabalus, kurie ima suktis aplink bendrą masės centrą, ir vietoj pavienės žvaigždės susidaro dvinarė ar daugianarė žvaigždė.

5.15.4. Žvaigždės gravitacinės trauksmos stadijoje

Iki šiol aptarinėjome teoriškai apskaičiuotą žvaigždėdaros mechanizmą. Dabar aprašysime realius žvaigždinius objektus, kurie yra aptariamoje pirmojoje raidos stadijoje. Pradėsime nuo jauniausių objektų.

1. Tamsių dulkinių debesų tankiausiose srityse aptinkami pavieniai objektai ir jų grupės, spinduliuojantys tik infraraudonojoje spektro srityje. Dešimtys tokių objektų yra Gyvatnešio–Skorpiono, Oriono ir kituose tamsių debesų telkiniuose. Greičiausiai tai yra įvairių masių prožvaigždės, esančios gravitacinio traukimosi, arba trauksmos, stadijoje. Masyvios prožvaigždės, esančios dar jas sudariusio dujų ir dulkių gniužulo gelmėse, žinomos ***Beklino objektų*** arba ***infražvaigždžių*** (angl. *infrastars*) vardu. Kai kurios iš šių infražvaigždžių yra stiprūs mazerinių radijo bangų šaltiniai. Išsamiau apie mazerinius šaltinius žr. **5.29.2** poskyryje. **5.8.1** poskyryje minėtosios Herbigo Ae/Be emisinės žvaigždės rodo požymius masyvių žvaigždžių, tik ką netekusių jas supusio tankaus apvalkalo (kokono).

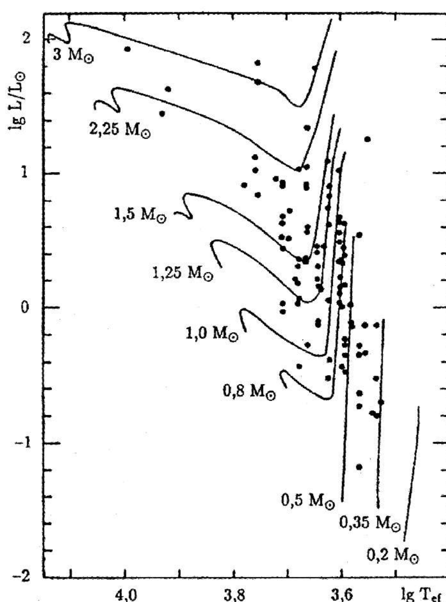
2. Kai kurių tamsių debesų pakraščiuose aptinkamos vadinamosios ***orionidės*** arba ***Tauro T klasės*** žvaigždės. Jų spektruose matoma daugybė žemo sužadinimo emisijos linijų: stipriausios yra visos vandenilio serijos, Ca II H ir K linijos ir infraraudonasis tripletas, ultravioletinis Mg II dubletas, infraraudonasis O I tripletas. Kitos emisijos linijos priklauso neutraliems ir vieną kartą jonizuotiems Fe, Ti, Ca, Si, He, S, O atomams. Emisijos linijos dažnai turi ir sugerties dedamąsias, pagal kurių tamsį galima spręsti, kad dauguma orionidžių priklauso G, K ir M spektrinėms klasėms. Kad orionidės yra jaunos žvaigždės, rodo šie požymiai:

a) HR diagramoje orionidės guli ant gravitacinės trauksmos konvekcinių raidos takų (**5.36** pav.);

b) orionidžių ryškis, spektro linijų stipris ir energijos pasiskirstymas spektre netaisyklingai kinta (*V* ryškio amplitudė kartais siekia net 4 ryškius), o tai rodo, kad šių žvaigždžių išoriniai sluoksniai yra labai aktyvūs;

c) orionidžių spektruose ypač stiprus ličio sugerties dubletas ties 670,8 nm, rodantis, kad litis dar nėra sudegęs branduolinėse reakcijose;

d) dauguma orionidžių apsuptos

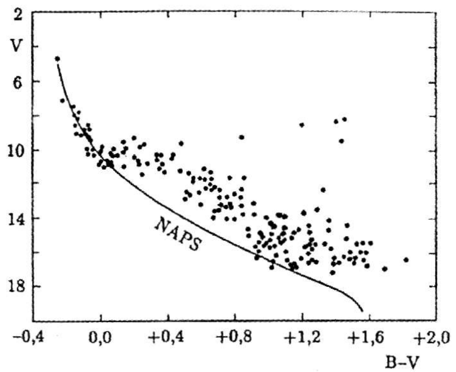


5.36 pav. *Orionidės HR diagramoje. Parodyti įvairių masių žvaigždžių raidos takai*

dulkių apvalkalų ar diskų, stipriai spinduliuojančių infraraudonojoje spektro srityje (1–5 μm); tai buvusio dujų ir dulkių gniužulo liekanos;

e) orionidės pasitaiko tik tamsiuose dulkių debesyse, dėl kurių gravitacinio nestabilumo susidaro dujų ir dulkių gniužulai – būsimosios prožvaigždės;

f) žinomos kelios orionidės (Oriono FU rūšies žvaigždės), kurios per trumpą laiką (dešimtys ir šimtai dienų) pašviesėjo iki 6 ryškių. Manoma, kad tai gali būti žvaigždės, pasiekusios savo šviesio maksimumą įvykus gravitaciniam kolapsui ir prasidėjus konvekcijai.



5.37 pav. *Jauno padrikojo spiečiaus NGC 2264 V, B–V diagrama. Nulinio amžiaus pagrindinę seką (NAPS) yra pasiekusios tik O ir B klasių žvaigždės. Mažesnių masių spiečiaus žvaigždės dar yra pakeliui į pagrindinę seką*

3. Jaunų žvaigždžių spiečių ir asociacijų, kurių amžius mažesnis nei 100 mln. m., visos žvaigždės, kurių fotosferos vėsesnės už ~10 000 K, HR diagramoje guli virš pagrindinės sekos (**5.37** pav.). Tai reiškia, kad jos dar yra gravitacinės trauksmos stadijoje ir nepasiekė pagrindinės sekos. Daug jų yra apsuptos dujų ir dulkių apvalkalų. Tačiau masyviausios O ir B spektrinių klasių žvaigždės, kurių raida greitesnė, jau yra išsivadavusios iš kokonų, kurių medžiagą išsklaidė į erdvę žvaigždžių šviesos slėgis ir elektringųjų dalelių vėjas.

Su žvaigždėdaros procesu yra susiję vadinamieji ***Herbigo ir Haro (HH) objektai.*** Tai maži (1–10″) netaisyklingos formos švytintys ploteliai tamsaus dulkių ūko fone. Jų spektruose matomos vandenilio, neutralaus ir jonizuoto deguonies, jonizuotos sieros ir jonizuotos geležies emisijos linijos. Visos linijos, išskyrus vandenilio, yra draustinės. Nustatyta, kad HH objektai matomi ten, kur jaunos žvaigždės išmesta plazmos čiurkšlė, sąveikaujanti su žvaigždę supančia dujų ir dulkių debesies medžiaga, išnyra iš už tamsaus debesies. Orionidės ir Herbigo žvaigždės išmeta plazmos čiurkšles dažniausiai iš abiejų ašigalių rajonų statmenai paviršiui iki 500 km/s greičiu. Čiurkšlių ilgis siekia 1 pc. Žinoma kelios dešimtys HH objektų, visi jie yra aktyvaus jaunų žvaigždžių formavimosi rajonuose.

5.16. BRANDUOLINĖS REAKCIJOS PAGRINDINĖJE SEKOJE

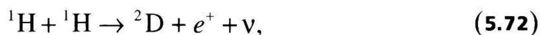
Jau minėjome, kad beveik visa pagrindinės sekos žvaigždžių spinduliuojama energija susidaro branduolinėse reakcijose, kurių metu keturi vandenilio atomų branduoliai – protonai laipsniškai susijungia į vieną helio branduolį. Keturių

protonų rimties masė atominiais masės vienetais yra 4 m_H = 1,007276·4 = 4,02910, o vieno ^{4}He branduolio masė yra 4,00049. Masės skirtumas, lygus 0,02861 atominės masės vienetų, reakcijoje pavirsta energija. Tai yra 0,712% pradinės vandenilio masės. Taigi, jei 1 g vandenilio virsta heliu, tai 0,00712 g medžiagos pavirsta energija. Pagal Einšteino formulę

$$E = mc^2 = 0,0071 \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 6,4 \cdot 10^{11} \text{ J}. \quad (5.71)$$

Saulės šviesiui 3,86·10^{26} W palaikyti reikia, kad heliu pavirstų 623 milijonų tonų vandenilio per sekundę, o tai reikš 4,4 milijonų tonų pavertimą energija. Maždaug 3% šios energijos išsineša neutrinai, o likusi eina Saulės spinduliavimui palaikyti.

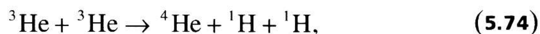
Pagrindinės sekos žvaigždėse H virsta He dviem būdais: protoninės serijos ir anglies–azoto–deguonies (CNO) ciklo reakcijose. ***Protoninė serija*** yra šių trijų reakcijų seka:



$$^1H + {}^1H \rightarrow {}^2D + e^+ + \nu, \quad (5.72)$$



$$^2D + {}^1H \rightarrow {}^3He + \gamma, \quad (5.73)$$



$$^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + {}^1H + {}^1H, \quad (5.74)$$

čia ^{1}H – protonas, ^{2}D – sunkiojo vandenilio branduolys deutronas, ^{3}He ir ^{4}He – helio izotopų branduoliai helionai, e^+ – pozitronas, ν – neutrinas, γ – gama fotonas. Pirmojoje reakcijoje susidaręs neutrinas šviesos greičiu perskrodžia visą žvaigždę ir netrukdomas išlekia į erdvę, išsinešdamas vidutiniškai 0,263 MeV energiją (maksimali jo energija – 0,420 MeV). Susidaręs pozitronas turi vidutinę 0,156 MeV energiją. Čia kalbame apie vidutinę neutrinų ir pozitronų energiją dėl to, kad (**5.72**) reakcijoje susidarę neutrinas ir pozitronas pasidalija energiją tarp savęs nevienodai. Kartais beveik visą energiją nusineša pozitronas, ir nieko nebelieka neutrinui, o kartais atvirkščiai – beveik visą energiją gauna neutrinas. Dėl to neutrino energija gali būti tarp 0 ir 0,420 MeV.

Susidaręs pozitronas tuoj pat susiduria su laisvu elektronu ir virsta dviem arba trimis gama fotonais, kurių suminė energija 1,022 MeV. Taigi pirmoji reakcija duoda bendrą energiją: 0,263 + 0,156 + 1,022 = 1,44 MeV. Antroje reakcijoje 5,492 MeV energiją išsineša gama fotonas. Trečiojoje reakcijoje helionas ir abu protonai iš viso gauna 12,861 MeV kinetinę energiją. Kadangi susidarant dviem ^{3}He branduoliams išsiskiria 2·(1,44 + 5,49) MeV energija, tai bendra energija, išskiriama susidarant vienam ^{4}He helionui, yra 26,72 MeV.

Energijos gamybos greitis priklauso nuo temperatūros ir vandenilio tankio žvaigždės centre:

$$\varepsilon_p \approx 27 \left(\frac{\rho}{100}\right) X^2 \left(\frac{T}{14 \cdot 10^6}\right)^n; \quad (5.75)$$

čia n šiek tiek priklauso nuo temperatūros: n = 4, kai T = 15 mln. K, n = 5, kai T = 6–10 mln. K. Ties Saulės centru, esant 15 mln. K temperatūrai, $\rho \approx 100$ g/cm^3

ir X = 1,0 (grynas vandenilis), $\varepsilon_p = 3{,}5 \cdot 10^{-6}$ J·g^{-1}·s^{-1}. Tokiomis sąlygomis būdinga reakcijų vyksmo trukmė* yra tokia: (**5.72**) reakcija – 14 mlrd. m., (**5.73**) reakcija – 6 sekundės, (**5.74**) reakcija – 1 mln. m.

Galimas ir kitas protoninės serijos paskutinės reakcijos variantas:



$$^{3}\mathrm{He} + {}^{4}\mathrm{He} \rightarrow {}^{7}\mathrm{Be} + \gamma. \qquad (\mathbf{5.76})$$

Čia susidaręs ^{7}Be yra radioaktyvus ir, užgrobęs iš savo orbitos elektroną, gali virsti ^{7}Li branduoliu, o tas tuoj pat sureaguoja su protonu ir virsta dviem helionais:



$$^{7}\mathrm{Be} + e^{-} \rightarrow {}^{7}\mathrm{Li} + \nu, \qquad (\mathbf{5.77})$$



$$^{7}\mathrm{Li} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow 2\,{}^{4}\mathrm{He}. \qquad (\mathbf{5.78})$$

Tačiau ^{7}Be , nesuspėjęs užgrobti elektrono, gali susidurti su protonu, ir tada įvyks šios reakcijos:



$$^{7}\mathrm{Be} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{8}\mathrm{B} + \gamma, \qquad (\mathbf{5.79})$$



$$^{8}\mathrm{B} \rightarrow {}^{8}\mathrm{Be} + e^{+} + \nu, \qquad (\mathbf{5.80})$$



$$^{8}\mathrm{Be} \rightarrow 2\,{}^{4}\mathrm{He}. \qquad (\mathbf{5.81})$$

Maždaug 70% visų protoninės serijos reakcijų vyksta pagal (**5.72**)–(**5.74**) schemą, 30% – pagal (**5.76**) – (**5.78**) schemą ir tik 0,1% – pagal (**5.79**) – (**5.81**) schemą.

Neutrinų energija (**5.77**) reakcijoje fiksuota ir lygi 0,862, o (**5.80**) reakcijoje – kinta nuo 0 iki 14,06 MeV, vidutinė 7,3 MeV.

Masyvesnėse už Saulę pagrindinės sekos žvaigždėse, kurių centruose temperatūra aukštesnė, be protoninės serijos reakcijų, taip pat vyksta ***CNO ciklas***:

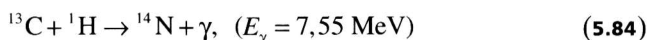


$$^{12}\mathrm{C} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{13}\mathrm{N} + \gamma, \quad (E_\gamma = 1{,}94 \text{ MeV}) \qquad (\mathbf{5.82})$$

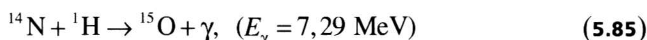


$$^{13}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}\mathrm{C} + e^{+} + \nu, \quad (E_\gamma = 2m_e c^2 = 1{,}02 \text{ MeV}) \qquad (\mathbf{5.83})$$

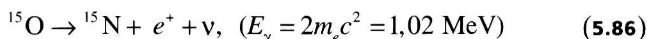
$$(E_{\mathrm{kin}} = 1{,}20 \text{ MeV})$$



$$^{13}\mathrm{C} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{14}\mathrm{N} + \gamma, \quad (E_\gamma = 7{,}55 \text{ MeV}) \qquad (\mathbf{5.84})$$

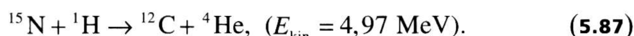


$$^{14}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{15}\mathrm{O} + \gamma, \quad (E_\gamma = 7{,}29 \text{ MeV}) \qquad (\mathbf{5.85})$$



$$^{15}\mathrm{O} \rightarrow {}^{15}\mathrm{N} + e^{+} + \nu, \quad (E_\gamma = 2m_e c^2 = 1{,}02 \text{ MeV}) \qquad (\mathbf{5.86})$$

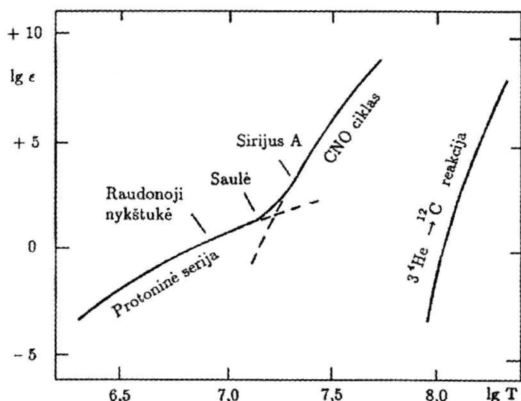
$$(E_{\mathrm{kin}} = 1{,}74 \text{ MeV})$$



$$^{15}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C} + {}^{4}\mathrm{He}, \quad (E_{\mathrm{kin}} = 4{,}97 \text{ MeV}). \qquad (\mathbf{5.87})$$

Šiame reakcijų cikle anglies ^{12}C branduoliai dalyvauja kaip katalizatorius padėdami 4 protonams susijungti į vieną helioną. Visas energijos kiekis, tenkantis vienam ciklui, yra 25,02 MeV arba $4 \cdot 10^{-12}$ J, t. y. kiek mažiau negu protoninėje

* Būdinga reakcijų vyksmo trukmė yra toks laiko tarpas, per kurį dalyvaujančių reakcijoje branduolių skaičius sumažėja *e* kartų, jei šie branduoliai nepapildomi kitose reakcijose.



5.38 pav. *Energijos gamybos greičio priklausomybė nuo temperatūros protoninės serijos, CNO ciklo ir* $3^4He \rightarrow {}^{12}C$ *reakcijose*

serijoje, nes du neutrinai išneša vidutiniškai 1,71 MeV energijos. Energijos gamybos greitis CNO cikle išreiškiamas formule:

$$\varepsilon_{\mathrm{CNO}} \approx 19 \left(\frac{\rho}{100}\right) \left(X \cdot 100 X_{\mathrm{CN}}\right) \left(\frac{T}{15 \cdot 10^6}\right)^n , \qquad (\mathbf{5.88})$$

kur n priklauso nuo temperatūros: $n = 20$, kai $T = 15$ mln. K ir $n = 15$, kai $T = 30$ mln. K. Ties Saulės centru, esant $T = 15$ mln. K, $\rho \approx 100$ g/cm^3, $X = 1{,}0$, $X(\mathrm{CN}) \approx 0{,}005X$, gauname $\varepsilon_{\mathrm{CNO}} = 9{,}5 \cdot 10^{-7}$ J·g^{-1}·s^{-1}. Energijos gamybos greitį priklausomai nuo temperatūros iliustruoja **5.38** pav. Matome, kad raudonųjų ir geltonųjų nykštukių, taip pat ir Saulės, centruose vyrauja protoninės serijos reakcijos. Tačiau CNO ciklo reakcijų įnašas į energijos gamybą, kylant temperatūrai, didėja daug sparčiau, ir abu įnašai susilygina ties lg $T = 7{,}25$, t. y. $T = 17$ mln. K. Tačiau truputį toliau nuo centro, kur temperatūra žemesnė, CNO ciklas užleidžia vietą protoninei serijai.

Maždaug 10 $M_\odot$ pagrindinės sekos žvaigždės centre temperatūra yra 30 mln. K, tankis 10 g/cm^3 ir vandenilio koncentracija $X = 0{,}5$. Tokiomis sąlygomis CNO ciklo reakcijų būdinga vyksmo trukmė yra šitokia: (**5.82**) reakcija – 360 m., (**5.83**) reakcija – 10 min. (^{13}N skilimo pusėjimo trukmė), (**5.84**) reakcija – 100 m., (**5.85**) reakcija – 25 000 m., (**5.86**) reakcija – 2 min. (^{15}O skilimo pusėjimo trukmė) ir (**5.87**) reakcija – 1 m. Saulės centre šios reakcijos vyksta 10^4–10^5 kartų lėčiau (išskyrus ^{13}N ir ^{15}O radioaktyvumą). Dėl didelių reakcijų greičio skirtumų kyla įvairių C, N ir O izotopų gausos pokyčiai vykstant CNO ciklui. Lėčiausiai vyksta (**5.85**) reakcija, todėl CNO cikle mažėja ^{12}C ir didėja ^{14}N kiekis. Dėl ^{12}C sumažėjimo smarkiai pasikeičia anglies izotopų ^{12}C/^{13}C gausos santykis: jei prieš prasidedant reakcijoms šis santykis ~90, tai CNO ciklo pusiausvyroje jis ~4. Dėl medžiagos maišymosi šie izotopų gausos pakitimai atsispindi kai kurių raudonųjų milžinių atmosferose.

Be aprašytųjų CNO ciklo (**5.82–5.87**) reakcijų, masyvių žvaigždžių centruose tarp lengvųjų branduolių vyksta ir kitos reakcijos, kurios yra svarbios ne kaip energijos šaltinis, bet kaip naujų izotopų gamybos būdas. Pavyzdžiui, branduolys ^{15}N, užgrobęs protoną, ne visada virsta ^{12}C + ^{4}He, bet kartais (tikimybė 0,001) virsta ^{16}O, ^{17}O arba ^{18}O branduoliais šiose reakcijose:



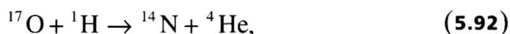
$$^{15}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{16}\mathrm{O} + \gamma, \qquad (5.89)$$



$$^{16}\mathrm{O} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{17}\mathrm{F} + \gamma, \qquad (5.90)$$



$$^{17}\mathrm{F} \rightarrow {}^{17}\mathrm{O} + e^{+} + \nu, \qquad (5.91)$$



$$^{17}\mathrm{O} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{14}\mathrm{N} + {}^{4}\mathrm{He}, \qquad (5.92)$$



$$^{17}\mathrm{O} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{18}\mathrm{F} + \gamma, \qquad (5.93)$$



$$^{18}\mathrm{F} \rightarrow {}^{18}\mathrm{O} + e^{+} + \nu, \qquad (5.94)$$



$$^{18}\mathrm{O} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{15}\mathrm{N} + {}^{4}\mathrm{He}. \qquad (5.95)$$

5.17. PAGRINDINĖS SEKOS ŽVAIGŽDŽIŲ RAIDA (ANTRASIS RAIDOS ETAPAS)

Kai besitraukiančios žvaigždės centre įsižiebia branduolinės reakcijos, HR diagramoje ji būna pagrindinės sekos juostos apatiniame pakraštyje, kuris vadinamas nulinio amžiaus pagrindine seka (žr. **5.7** poskyrį). Tai reiškia, kad duotai masei ir cheminei sudėčiai (X,Y,Z) NAPS žvaigždė turi mažiausią spindulį. Vėlesniais raidos etapais jos spindulys gali būti tik didesnis (išskyrus pačias vėlyviausias evoliucijos stadijas, kai žvaigždėje baigiasi branduolinio kuro šaltiniai).

Susitraukusios žvaigždės padėtis pagrindinėje sekoje priklauso nuo jos masės. Kuo masė didesnė, tuo aukščiau yra duotoji NAPS žvaigždė, taigi tuo ji turi didesnį šviesį. Masyviausios yra O spektrinės klasės žvaigždės kairiajame viršutiniame pagrindinės sekos gale ir mažiausios masės M spektrinės klasės nykštukės yra dešiniajame apatiniame pagrindinės sekos gale. Pagrindinėje sekoje žvaigždės praleidžia didžiąją dalį savo raidos. Pavyzdžiui, Saulės masės žvaigždės čia būna ~80% laiko. Jų centrinėse dalyse pamažu dega vandenilis virsdamas heliu.

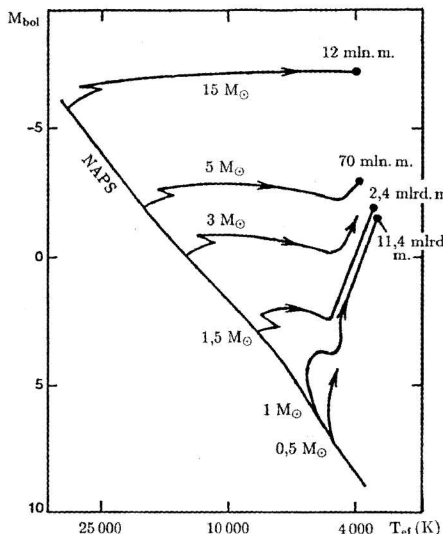
Kuo didesnės masės žvaigždė, tuo ji trumpiau apsistoja pagrindinėje sekoje, nes vandenilio degimas vyksta daug sparčiau. Jei 1 $M_\odot$ žvaigždė pagrindinėje sekoje būna 10 mlrd. m., tai 2 $M_\odot$ žvaigždė – 2 mlrd. m., 5 $M_\odot$ žvaigždė – 100 mln. m., 10 $M_\odot$ žvaigždė – 25 mln. m., 15 $M_\odot$ žvaigždė – 10 mln. m., o 40 $M_\odot$ žvaigždė – tik 1 mln. m. Antra vertus, mažesnės už Saulę žvaigždės pagrindinėje sekoje išbūna gerokai ilgiau: vėsiausios raudonosios nykštukės pagrindinėje sekoje turėtų išbūti apie 100 mlrd. metų.

Nulinio amžiaus pagrindinės sekos padėtis teorinėje (lg $L/L_\odot$, lg T_{ef})

diagramoje šiek tiek priklauso nuo žvaigždžių pradinės cheminės sudėties X, Y ir Z. Mažinant vandenilio kiekį X (t. y. didinant helio kiekį Y), NAPS slenka lygiagrečiai sau žemyn arba į kairę. Tai įvyksta dėl vidutinės atominės masės μ, tenkančios vienai dalelei, padidėjimo (žr. **5.42** formulę). Mažėjant vandenilio gausai, mažėja dalelių skaičius masės gramui, ir reikalavimas išlaikyti slėgio balansą verčia žvaigždę daugiau susitraukti. Antra vertus, mažinant sunkiųjų elementų kiekį Z, NAPS slenka irgi į kairę ir žemyn, bet dėl kitos priežasties: Z pokyčiai veikia žvaigždės šviesį L ir T_{ef} per spindulių sugerties žvaigždės tūryje mechanizmą. Dėl už helį sunkesnių elementų trūkumo subnykštukių medžiaga yra daug skaidresnė, ir todėl jų šerdys daug karštesnės, jose greičiau vyksta branduolinės reakcijos negu tos pačios masės pagrindinės sekos žvaigždėse.

Poskyryje **5.8.6** aprašytosios subnykštukės yra pagrindinės sekos žvaigždės, turinčios didelį metalų trūkumą, jei lyginsime su Saule. Dėl šios priežasties subnykštukių seka HR diagramoje eina maždaug 1–1,5 ryškio žemiau negu Saulės cheminės sudėties nykštukių seka, nes to paties šviesio subnykštukė (nors ji ir mažesnės masės) yra aukštesnės efektinės temperatūros negu pagrindinės sekos žvaigždė. O lygindami vienodų masių subnykštukės ir pagrindinės sekos žvaigždės padėtis HR diagramoje, pamatome, kad subnykštukė yra ne tik kairiau, bet ir aukščiau (didesnio šviesio).

NAPS žvaigždėse vandenilis dega pačiame žvaigždės centre, kur temperatūra aukščiausia. Degimo apimtas tūris yra didesnis masyvesnėse žvaigždėse. Kai centrinėje dalyje vandenilis baigia degti, čia susidaro helinė šerdis. Vandenilio degimas pereina į ploną sluoksnį aplink šią šerdį, kuri, neturėdama branduolinių energijos šaltinių, ima trauktis ir karštėti gravitacijos energijai virstant kinetine energija. Dėl šio papildomo energijos šaltinio visos žvaigždės šviesis ir jos skersmuo ima didėti. HR diagramoje žvaigždė pamažu apleidžia nulinio amžiaus pagrindinę seką kildama į dešinę ir aukštyn, raudonųjų milžinių link (**5.39** pav.).

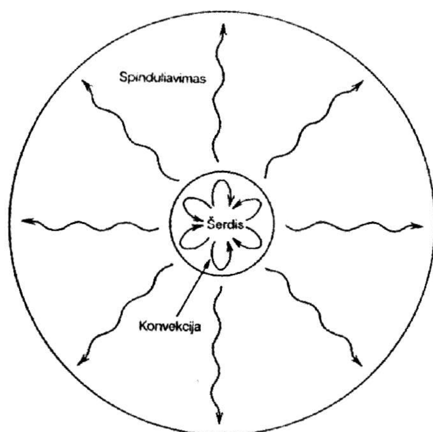


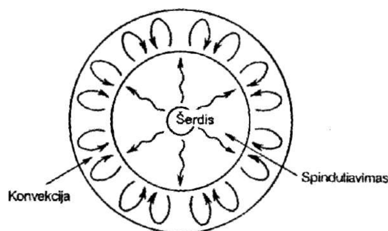
5.39 pav. *Įvairių masių pagrindinės sekos žvaigždžių raidos takai HR diagramoje. Skaičiai žymi laikotarpį metais, per kurį žvaigždė pasiekia raudonųjų milžinių ar supermilžinių sritį*

Žvaigždės sandara centrinėje jos srityje degant vandeniliui gerokai skiriasi tarp viršutinės ir apatinės pagrindinės sekos dalies. **5.40** paveiksle parodomi masyvios ir mažos masės

žvaigždžių pjūviai. Kai pagrindinės sekos žvaigždės masė yra 10 $M_\odot$ (spektrinė klasė B0 V), jos centre temperatūra siekia 27 mln. K ir energijos išskyrimas CNO ciklo reakcijose toks galingas, kad elektromagnetiniai spinduliai nespėja pernešti visos energijos, ir prasideda konvekcija. Konvekcinė zona apima 1/4 visos žvaigždės masės. Susidarius šiai zonai, ne tik lengviau vyksta energijos pernaša, bet ir atnešami į žvaigždės centrą vis nauji vandenilio kiekiai, kurie pakeičia jo degimo produktus. Taigi konvekcinė zona gerokai padidina branduolinio kuro atsargas, ir todėl žvaigždė ilgiau užsibūna pagrindinėje sekoje.

Virš konvekcinės zonos iki pat paviršiaus energiją perneša fotonai. Konvekcinė zona A spektrinės klasės žvaigždėse užima tik 1/10 žvaigždės masės, o F klasės žvaigždėse dar mažiau.



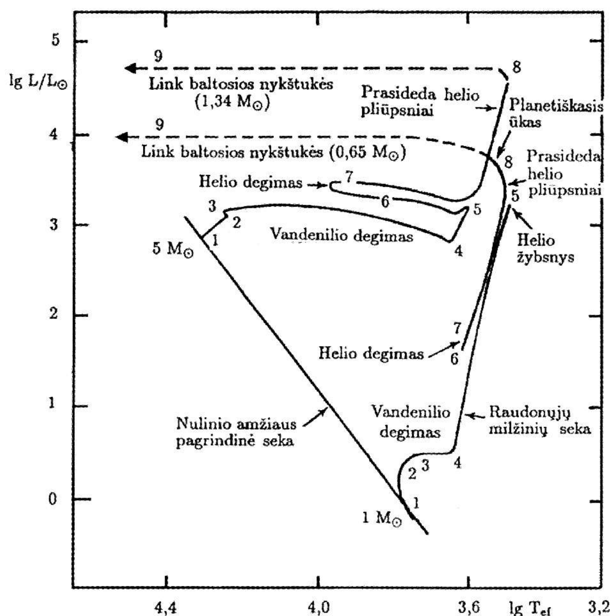


5.40 pav. *Didelės ir mažos masių pagrindinės sekos žvaigždžių vidinė sandara. Didelės masės žvaigždė turi konvekcinę zoną šerdyje, o mažos masės žvaigždė – ties paviršiumi*

Panašiose į Saulę žvaigždėse, kuriose vyksta protoninės serijos reakcijos, konvekcinės zonos ties žvaigždės centru nėra visai, energija per visą tūrį pernešama spinduliavimu. Tik ties paviršiumi yra konvekcinis sluoksnis, kuris apima vos 2% Saulės masės arba 15% jos spindulio. Jis susidaro dėl staigaus sugerties koeficiento padidėjimo pereinant į mažesnės jonizacijos vandenilio ir helio zonas. K spektrinės klasės nykštukėse paviršiaus konvekcinė zona daug storesnė, o M klasės nykštukėse ši zona apima visą žvaigždę. A ir F klasių žvaigždėse paviršiaus konvekcinė zona daug plonesnė negu Saulėje, o O ir B klasių žvaigždėse jos iš viso nėra.

5.18. PAKELIUI Į RAUDONĄSIAS MILŽINES (TREČIASIS RAIDOS ETAPAS)

Nors ir vyksta konvekcija ir medžiagos maišymasis, masyviųjų žvaigždžių gelmėse vandenilis greitai išeikvojamas. Susidariusi helinė šerdis traukiasi, jos temperatūra kyla, ir žvaigždė apleidžia nulinio amžiaus pagrindinę seką. **5.41** pav. vaizduojami raidos takai 1 $M_\odot$ ir 5 $M_\odot$ masės žvaigždėms. Taškas *1* yra



5.41 pav. *1 ir 5 Saulės masių Saulės cheminės sudėties žvaigždžių raidos takai HR diagramoje. Paaiškinimai – tekste*

nulinio amžiaus pagrindinėje sekoje, kurioje vandenilis dega žvaigždės šerdyje. Taškas *2* atitinka stadiją, kai visas vandenilis šerdyje išsieikvojo ir virto heliu, *3* – vandenilis ima degti sferiniame sluoksnyje aplink helinę šerdį. Dėl šerdies temperatūros didėjimo šerdį supantys žvaigždės sluoksniai plečiasi, didėjant žvaigždės skersmeniui krinta jos paviršiaus temperatūra, ir žvaigždė, maždaug išlaikydama savo šviesį, slenka HR diagramoje į dešinę, žemų temperatūrų kryptimi (taško *4* link). Tolesnė raida gerokai skiriasi įvairios masės žvaigždėms.

Jei žvaigždės masė artima Saulei, raida vyksta maždaug taip. Taške *4* žvaigždės tūryje prasideda konvekcija, susijusi su medžiagos sugerties koeficiento κ didėjimu mažėjant temperatūrai. Dėl to daugiau energijos išnešama į paviršių, ir žvaigždės šviesis ima didėti – ji juda taško *5* link. Tuo pat metu helinė žvaigždės šerdis tebesitraukia, ir jos centro temperatūra didėja. Kai žvaigždė pasiekia milžinių sekos viršūnę, šerdies tankis tampa 100 kg/cm^3. Šerdyje esančios elektroninės dujos virsta degeneruota (išsigimusia) medžiaga. Skirtingai nuo įprastų dujų, kuriuose slėgis yra tiesiog proporcingas temperatūrai, degeneruotose elektroninėse dujose slėgis priklauso ne nuo temperatūros, o tik nuo tankio. Elektroninių dujų slėgis yra pakankamas, kad sustabdytų žvaigždės šerdies traukimąsi, netgi kai ji neturi vidinių energijos šaltinių.

Kai šerdies temperatūra artėja prie 100 mln. K, joje prasideda elementariųjų dalelių reakcijos, kurių metu susidaro neutrinai ir antineutrinai; tai vadinamasis ***fotoneutrininis procesas***

$$\gamma + e^- \to e^- + \nu + \bar{\nu}, \qquad (5.96)$$

URCA procesas

$$p + e^- \to n + \nu \; ; \; n \to p + e^- + \bar{\nu}\,, \qquad (5.97)$$

$$(Z,A) + e^- \to (Z-1, A) + \nu \; ; \; (Z-1, A) \to (Z,A) + e^- + \bar{\nu} \; * \qquad (5.98)$$

bei elektronų ir pozitronų ***anihiliacija***:

$$e^+ + e^- \to \nu + \bar{\nu}. \qquad (5.99)$$

Šiuose procesuose susidarę neutrinai (ν) ir antineutrinai ($\bar{\nu}$) nekliudomai apleidžia žvaigždę ir išsineša didelę energiją. Dėl to sulėtėja temperatūros kilimas ir pailgėja žvaigždės raida raudonųjų milžinių sekoje. Neutrinų gamybos procesai nuolat stiprėja kylant temperatūrai.

5.19. HELIO ŽYBSNYS, HORIZONTALIOJI IR ASIMPTOTINĖ SEKOS

Taigi Saulės masės raudonoji milžinė turi mažą (0,1% spindulio) helinę šerdį, kuri talpina 25–30% visos žvaigždės masės. Šerdis neturi energijos šaltinių, taigi ji yra izoterminė. Aplink šerdį yra sferinė vandenilio degimo zona CNO ciklo branduolinėse reakcijose, toliau paviršiaus link tęsiasi didžiulis labai mažo tankio tūris, kuriame vyksta intensyvi energiją pernešanti konvekcija. Ties pačiu paviršiumi yra ~10% žvaigždės spindulio storio sferinė zona, kurioje energija pernešama spinduliais.

Šerdies masė vis didėja, prie jo prisidedant helionams, susidarantiems vandenilio degimo reakcijų sferiniame sluoksnyje metu. Kartu šerdį kaitina aplink ją vykstančios vandenilio degimo reakcijos. Kai šerdies masė tampa 0,4–0,5 $M_{\odot}$, o temperatūra pasiekia 100 mln. K, joje staigiai pradeda degti helis virsdamas anglimi. Šios branduolinės reakcijos vyksta taip: du helionai susijungia į berilio-8 branduolį, kuris yra labai nepastovus ir iš karto (per 10^{-16} s) vėl skyla į du helionus. Tačiau, kai tankis labai didelis, dar nespėjus suskilti ^{8}Be branduoliui, prie jo prisijungia trečias helionas, ir susidaro ^{12}C izotopo branduolys:

$$^4\mathrm{He} + {}^4\mathrm{He} \to {}^8\mathrm{Be}\,, \qquad (5.100)$$

$$^8\mathrm{Be} + {}^4\mathrm{He} \to {}^{12}\mathrm{C} + \gamma \;\; (E_\gamma = 7{,}275\ \mathrm{MeV}). \qquad (5.101)$$

Tai vadinamoji ***triguba helio reakcija*** arba Salpyterio (*E. Salpeter*, JAV astronomas) procesas. Energijos išskyrimo greitis šioje reakcijoje yra

$$\varepsilon = 10^8 \rho^2 Y^3 \left(\frac{T}{10^8}\right)^n, \qquad (5.102)$$

* (Z, A) yra atomo branduolys su protonų skaičiumi Z ir atomine mase (bendru nukleonų skaičiumi) A.

čia helio dalis $Y = 1$, o $n \approx 40$, kai $T = 100$ mln. K ir $n \approx 30$, kai $T = 200$ mln. K. Energijos išskyrimo greičio priklausomybė nuo temperatūros trigubai helio reakcijai parodoma **5.38** pav.

Prasidėjus helio degimo reakcijoms, degeneruotoje helinėje šerdyje išsiskiria daug energijos, ir temperatūra staiga pakyla. Normaliose dujose dėl to padidėtų slėgis, ir dujos išsiplėstų. Kadangi degeneruotų dujų slėgis nepriklauso nuo temperatūros, tai šerdis nesiplečia. Pakilusi temperatūra tik dar labiau paspartina branduolines reakcijas, o tai pasireiškia temperatūros didėjimu iki 350 mln. K. Per kelias sekundes branduolinės reakcijos apima didelę helinės šerdies dalį, ir įvyksta sprogimas, vadinamas ***helio žybsniu*** (angl. *helium flash*). Jo metu sudega apie 50% šerdyje susikaupusio helio.

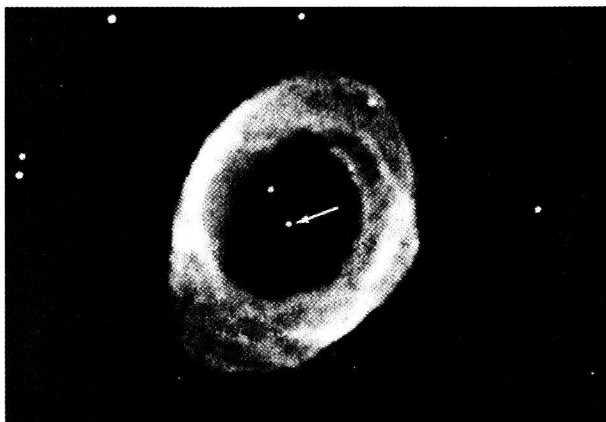
Helio žybsnys yra galingas įvykis, ir jo padariniai turi būti pastebimi žvaigždės paviršiuje. Po žybsnio per visą žvaigždės tūrį nusirita stipri smūginė banga, kuri, pasiekusi paviršių, gali nublokšti į erdvę dalį žvaigždės išorinių sluoksnių medžiagos. Gaila, bet iki šiol neaptikta nė viena raudonoji milžinė, kurioje būtų pastebėti tik ką įvykusio helio žybsnio padariniai.

Taip pat tikėtina, kad helio žybsnys sumaišo šerdies viduje esantį helį ir naujai susidariusią anglį su šerdį supančių sluoksnių medžiaga. Staiga baigiasi šerdies elektroninių dujų degeneracija. Slėgis vėl tampa proporcingas temperatūrai, ir helio degimas žvaigždės centrinėje dalyje tampa pastovus.

Po helio žybsnio išoriniai žvaigždės sluoksniai šiek tiek susitraukia, jų temperatūra pakyla, ir žvaigždė HR diagramoje per palyginti trumpą laiką (šimtus ar tūkstančius metų) pereina arba į ***raudonųjų milžinių sankaupą*** (angl. *red giant clump*), esančią ties absoliutiniu ryškiu M_V tarp 0,5 ir 1,0 ir spalvos rodikliu $B–V = 1,0$ (taškas 6 HR diagramoje **5.41** pav. ir skrituliukas **5.49** pav.), arba į ***horizontaliąją seką*** (angl. *horizontal branch)*, einančią nuo vėsių iki karštų žvaigždžių $M_V \approx +0,5$ lygyje (žr. **5.49** pav.). Po helio žybsnio į sankaupą patenka raudonosios milžinės, kurių metalingumas artimas Saulės metalingumui, o į horizontaliąją seką patenka buvusios nemetalingosios milžinės (žr. **5.26** poskyrį). Tiek milžinių sankaupos, tiek horizontaliosios sekos žvaigždėse yra du branduolinės energijos šaltiniai: ties centru dega helis, virsdamas anglimi, o aplink šerdį sferiniame sluoksnyje dega vandenilis virsdamas heliu.

Po kelių dešimčių milijonų metų visas helis žvaigždės šerdyje virsta anglimi, ir helio degimas pereina į sferinį sluoksnį aplink anglinę šerdį, kurioje elektroninės dujos vėl tampa degeneruotomis. Žvaigždė vėl ima šviesėti, o jos fotosferos temperatūra kristi, ji vėl kyla į raudonųjų milžinių sekos viršūnę (**5.41** pav., taškas *8*). Tokios žvaigždės vadinamos asimptotinės sekos milžinėmis. ***Asimptotinė seka*** (angl. *asymptotic branch)* eina lygiagrečiai normalių milžinių sekai, tik šiek tiek aukščiau.

Asimptotinės sekos milžinės turi du sluoksnius, kuriuose vyksta branduolinės reakcijos: aplink anglinę šerdį dega helis virsdamas anglimi, o kitame



5.42 pav. *Planetiškasis Žiedo ūkas Lyros žvaigždyne. Rodykle parodyta žvaigždė, nusimetusi apvalkalą*

sluoksnyje, arčiau paviršiaus, dega vandenilis virsdamas heliu. Kadangi helio degimo reakcijų greitis labai priklauso nuo temperatūros, mažiausios jos fliuktuacijos sukelia reakcijų sulėtėjimą. Tad energijos išskyrimo greitis helio degimo zonoje yra nepastovus: helis dega trumpais, bet stipriais žybsniais, sukeliančiais žvaigždės nestabilumą. Virš helio degimo zonos susidaro konvekcinė zona, siekianti vandenilio degimo sluoksnį, ir prasideda medžiagos maišymasis tarp vandenilio, helio ir anglies turtingų sluoksnių. Tai sudaro geras sąlygas vykti daugybei branduolinių reakcijų, svarbių įvairių cheminių elementų izotopų sintezei.

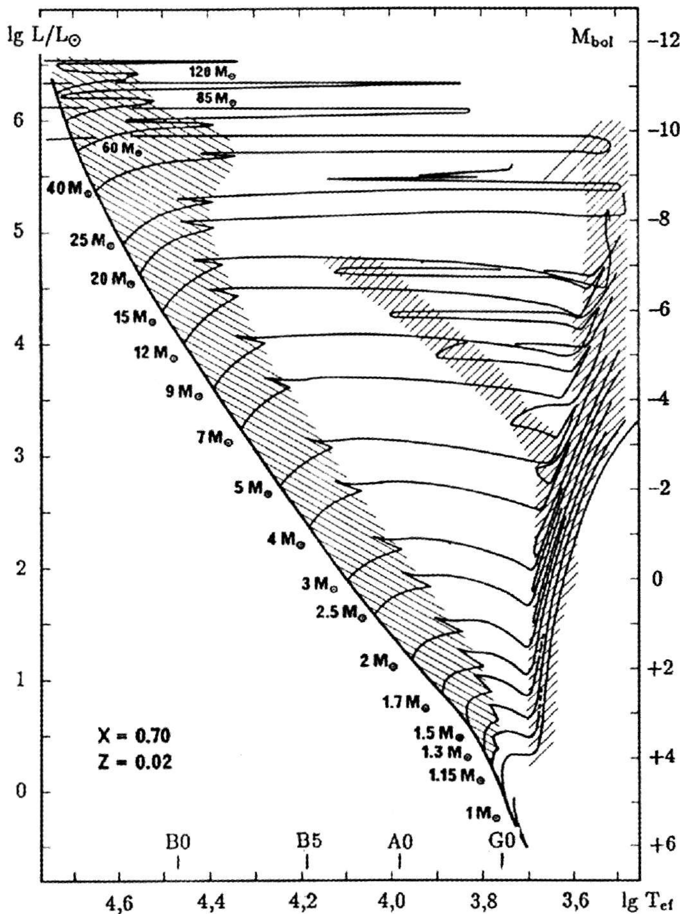
Tiek helio, tiek vandenilio degimo sluoksniai pamažu artėja prie paviršiaus. Kai sluoksnis virš vandenilio degimo zonos pasidaro pakankamai plonas, helio degimo žybsniai ima daryti įtaką žvaigždės paviršiaus temperatūrai ir jos šviesiui. Dėl to helio žybsnių metu asimptotinės sekos žvaigždės HR diagramoje kurį laiką apleidžia raudonųjų milžinių sritį ir nutolsta į kairę, o po to vėl grįžta atgal. Tokia horizontalia kilpa žvaigždė slenka 1000–10 000 m.

Kai žvaigždė pasiekia asimptotinės sekos viršūnę, jos išoriniai sluoksniai ima pulsuoti, ir žvaigždė tampa kintamąja žvaigžde, vadinama ***miride*** (angl. *Mira-variable*) (žr. **5.29.2** poskyrį). Vandenilio degimo sluoksnis pamažu išnyksta. Kai helio degimo sluoksnis priartėja prie paviršiaus, žvaigždė nusimeta nuo savęs išorinius sluoksnius, kurie 20–50 km/s greičiu išsisklaido erdvėje kaip ***planetiškasis ūkas*** (angl. *planetary nebula*) (**5.42** pav.), o buvusi žvaigždės anglinė šerdis su išorinių sluoksnių likučiais virsta iš pradžių labai karšta (iki 100 000 K) planetiškojo ūko centrine žvaigžde, o po to – ***baltąja nykštuke*** (angl. *white dwarf*) (žr. **5.21** poskyrį). Asimptotinėje sekoje žvaigždė evoliucionuoja kelis mln. m., o planetiškojo ūko stadija trunka apie 10 000–100 000 m.

5.20. DIDELĖS MASĖS ŽVAIGŽDŽIŲ RAIDA

Dabar pereikime prie žvaigždžių, kurių masė 2–8 kartus didesnė nei Saulės masė. Tai A ir B spektrinių klasių žvaigždės, kai jos yra pagrindinėje sekoje. Tokių žvaigždžių raida daug kuo panaši į aprašytąją 1 $M_{\odot}$ žvaigždės raidą, bet yra keli svarbūs skirtumai.

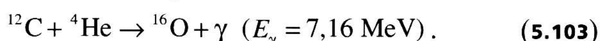
Pirmiausia – skiriasi raidos laiko skalė, nes masyviose žvaigždėse centro temperatūra yra didesnė ir visos branduolinės reakcijos vyksta daug greičiau. Vandenilis šerdyje sudega per ~100 mln. m., ir tada branduolinės reakcijos trumpam (1–2 mln. m.) užgęsta (taškas *2* **5.41** pav.). Žvaigždė, likusi be



5.43 pav. *Žvaigždžių, kurių pradinė masė pagrindinėje sekoje ≥1 $M_{\odot}$, raidos takai HR diagramoje. Užbrūkšniuotos diagramos sritys, kuriose žvaigždžių raida vyksta lėčiausiai; tose srityse matomas didžiausias žvaigždžių skaičius*

branduolinės energijos šaltinių, ima trauktis, ir jos paviršius karštėja, tad jos raidos takas HR diagramoje pasuka į kairę. Po to vandenilis ima degti jau sferiniame sluoksnyje, aplink helinę šerdį (taškas *3*), ir žvaigždės raidos takas vėl pasuka į dešinę raudonųjų milžinių link. Per kelis šimtus tūkstančių metų žvaigždė tampa raudonąja milžine, bet jos šviesis būna gerokai didesnis už Saulės masės milžinių šviesį. Kuo masyvesnė žvaigždė, tuo didesnis jos šviesis, kai ji yra raudonųjų milžinių srityje.

Kita didelės masės žvaigždžių raidos ypatybė yra ta, kad, būnant raudonųjų milžinių stadijoje, jų elektroninės dujos šerdyje niekada nebūna degeneruotos. Dėl to helio žybsnys neįvyksta, o helis iš karto pradeda ramiai degti virsdamas anglimi. Kartu su $3^4\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C}$ reakcija šerdyje vyksta ir helio reakcijos su ką tik susidariusia anglimi:



$$^{12}\mathrm{C} + {}^4\mathrm{He} \rightarrow {}^{16}\mathrm{O} + \gamma \quad (E_\gamma = 7{,}16\ \mathrm{MeV}). \qquad (5.103)$$

Čia susidaro deguonies $^{16}\mathrm{O}$ izotopas, kurio ir taip jau nemažai yra pradinėje žvaigždės sudėtyje. Ši reakcija labai greitėja kylant temperatūrai, taigi deguonis daugiausia susidaro ties žvaigždės centru, kur temperatūra aukščiausia.

Užsidegus heliui, masyvi žvaigždė milžinė ima karštėti ir mažėti slinkdama HR diagramoje horizontaliai į kairę. Kuo žvaigždės masė didesnė, tuo toliau ji nueina į kairę. Pavyzdžiui, 5 $M_\odot$ žvaigždė pasiekia G spektrinę klasę, o 8 $M_\odot$ žvaigždė – A spektrinę klasę. Ties kilpos galu (**5.41** pav. taškas 7) žvaigždė užsibūna ilgiausiai: nuo 20 mln. m. 5 $M_\odot$ žvaigždei iki 6 mln. m. 8 $M_\odot$ žvaigždei. Tad šioje HR diagramos vietoje susidaro helį deginančių šerdyje žvaigždžių seka, analogiška vandenilį deginančiai pagrindinei sekai (**5.43** pav.). Kadangi helis žvaigždėje dega 3–4 kartus trumpiau negu vandenilis, tai helio sekoje stebima daug mažiau žvaigždžių. Heliui degant, centre susidaro anglinė-deguoninė šerdis, kuri, gravitacijos jėgų veikiama, traukiasi, ir jos medžiaga degeneruoja. Helio degimas pereina į sferinį sluoksnį, žvaigždė vėl ima pūstis pereidama į asimptotinę seką (tarp taškų *7* ir *8* **5.41** pav.). Pasiekusi didžiausią šviesį ir žemiausią temperatūrą (raudonoji supermilžinė), žvaigždė tampa pulsuojančia miride, po to infraraudonąja miride, skleidžiančia mazerinį radijo spinduliavimą, dar po to nusimeta planetiškąjį ūką, ir likusi degeneruotos medžiagos šerdis tampa baltąja nykštuke, susidedančia tik iš anglies ir deguonies.

Kaip vėliau patirsime, baltosios nykštukės niekada negali turėti masės, didesnės už 1,44 $M_\odot$. Tad buvusi 2–8 $M_\odot$ masės žvaigždė raidos metu turi išsklaidyti didelę dalį savo masės. Jos medžiaga išgaruoja iš paviršiaus elektringųjų dalelių vėju, kuris esti stipriausias raudonosios milžinės, ypač – raudonosios supermilžinės fazėje. Dalis žvaigždės masės išsisklaido erdvėje planetiškojo ūko pavidalu.

5.21. BALTOSIOS NYKŠTUKĖS (KETVIRTASIS RAIDOS ETAPAS)

Tai žvaigždžių liekanos, kuriomis virsta visos pagrindinės sekos žvaigždės, kurių masė <2 $M_{\odot}$, ir ypač daug pagrindinės sekos žvaigždžių, kurių masė yra tarp 2 ir 8 $M_{\odot}$. Tai buvusių asimptotinės sekos žvaigždžių anglinės arba anglinės-deguoninės šerdys, netekusios išorinių buvusios žvaigždės apvalkalų, kurie išsisklaidė erdvėje planetiškojo ūko pavidalu.

Baltųjų nykštukių masės yra 0,5–1,4 $M_{\odot}$, o skersmenys 50–200 kartų mažesni negu Saulės skersmuo, taigi savo dydžiu prilygsta Žemei ar net Mėnuliui. Dėl to baltųjų nykštukių medžiagos vidutinis tankis yra ~1 t/cm^3. Tokio tankio medžiagoje elektronų dujos yra degeneruotos, todėl baltosios nykštukės dažnai vadinamos ***degeneruotomis*** arba ***išsigimusiomis*** žvaigždėmis (angl. *degenerated stars*). Pavadinimas „baltosios nykštukės" susijęs su pirmųjų atrastų šios klasės žvaigždžių – Sirijaus B ir Eridano 40B balta spalva. Nustatyta, kad 3–10% visų Galaktikos žvaigždžių yra baltosios nykštukės.

Baltosios nykštukės egzistuoja tik dėl gravitacijos ir degeneruotų elektroninių dujų slėgio pusiausvyros, nes neturi jokių branduolinės energijos šaltinių. Elektronų slėgis priklauso tik nuo medžiagos tankio ir nepriklauso nuo temperatūros. Vadinasi, yra vienareikšmė priklausomybė tarp masės ir spindulio: kuo didesnė baltosios nykštukės masė, tuo mažesnis jos spindulys. Be to, ta masė negali būti kiek norint didelė – ji neturi būti didesnė negu 1,44 $M_{\odot}$, vadinamoji ***Čandrasekaro riba*** (*S. Chandrasekhar* – indų kilmės JAV astronomas). Jei masė didesnė, įvyksta gravitacinis kolapsas, ir baltoji nykštukė sprogsta kaip I rūšies supernova (smulkiau – **5.23** poskyryje). Baltosios nykštukės temperatūra beveik visame jos tūryje vienoda (1–10 mln. K), nes degeneruotos elektronų dujos yra labai geras šilumos laidininkas. Tik paviršiniame kelių dešimčių km storio sluoksnyje, kur medžiagos degeneracijos nėra, temperatūra turėtų staigiai mažėti.

HR diagramoje baltosios nykštukės sudaro seką, maždaug lygiagrečią pagrindinei sekai, bet esančią 10 ryškių žemiau (**5.11** pav.). Karščiausių baltųjų nykštukių paviršiaus temperatūra yra apie 100 000 K, vėsiausių (žinomų) – apie 4000 K. Jos spinduliuoja ankstesnės raidos procese sukauptą šiluminę energiją ir po truputį vėsta judėdamos į dešinę ir žemyn išilgai pastovaus skersmens linijos. Vėsimas trunka labai ilgai – 5 mlrd. m., nes baltųjų nykštukių atmosferos plazma yra labai neskaidri ir veikia lyg antklodė. Ataušusi baltoji nykštukė nebespinduliuos regimosios šviesos ir virs infraraudonąja, o po to juodąja nykštuke.

Baltųjų nykštukių cheminė sudėtis atspindi ankstesnėse raidos stadijose vykusias branduolines reakcijas. Tos baltosios nykštukės, kurios susidarė iš pagrindinės sekos žvaigždžių su pradine mase <2 $M_{\odot}$, sudarytos beveik vien iš anglies izotopo ^{12}C. Kitose baltosiose nykštukėse, kurios susidarė iš žvaigž-

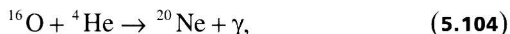
džių su pradine mase 2–8 $M_\odot$, turi būti deguonies izotopo ^{16}O šerdis ir anglies izotopo ^{12}C apvalkalas. Helio ir vandenilio galima tikėtis rasti tik išoriniuose baltųjų nykštukių sluoksniuose.

Baltųjų nykštukių spektrai rodo didelę įvairovę. Pirmiausia krinta į akis didžiulis spektro linijų plotis, kurį sukelia Štarko reiškinys esant labai tankiai atmosferai ir dažniems atomų susidūrimams. Be to, spektro linijos pasislinkusios į raudonąją spektro pusę per 0,5–1,0 nm dėl labai didelės gravitacijos žvaigždės paviršiuje.

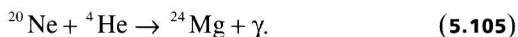
Atmosferų cheminė sudėtis labai įvairi – 70–75% baltųjų nykštukių spektruose matyti vien vandenilio linijos (DA klasė), kitų spektruose yra vien helio linijos (DO ir DB klasės), trečių – kai kurių metalų – Ca, Fe, Mg, Na linijos (DZ klasė), ketvirtų – anglies molekulių juostos ir anglies atomų linijos (DQ klasė). Yra baltųjų nykštukių visai be jokių linijų (DC klasė). Kai kurios baltosios nykštukės turi 100–1000 T srauto tankio magnetinius laukus. Tokiuose stipriuose laukuose spektrinės linijos dėl Zėmano reiškinio yra suskilusios ir pasislinkusios iš savo tikrosios padėties kartais net per dešimtis nanometrų. Dėl to kai kurių baltųjų nykštukių spektrai iki šiol neiššifruoti. Baltųjų nykštukių atmosferų cheminės sudėties skirtumai paaiškinami elementų sinteze prieš tai buvusios žvaigždės raidoje, medžiagos akrecija (užgrobimu) iš tarpžvaigždinės erdvės bei sunkesniųjų atomų grimzdimu gilyn labai stipriame gravitacijos lauke.

5.22. DIDŽIAUSIOS MASĖS ŽVAIGŽDŽIŲ RAIDA

Kai žvaigždžių pradinė masė yra > 8 $M_\odot$ (pagrindinės sekos O spektrinės klasės žvaigždės), jų centruose temperatūra pasiekia didesnes reikšmes, kuriose daug sparčiau vyksta jau minėtos ir naujos branduolinės reakcijos. Pirmiausia, tokių masių žvaigždėse vandenilis dega taip greitai, kad centrinėje dalyje jis išsenka per 3–30 mln. m. HR diagramoje žvaigždė apleidžia pagrindinę seką ir horizontaliu raidos taku slenka raudonųjų supermilžinių link. Helis ima degti centre dar žvaigždei esant pakeliui į raudonąsias milžines, ir tai trunka 0,5–5 mln. m. Degant heliui, taip pat intensyviai vyksta α ***proceso*** branduolinės reakcijos, kurios prasideda (**5.103**) reakcija. Susidaręs ^{16}O toliau reaguoja su helionais ir sudaro ^{20}Ne ir ^{24}Mg:



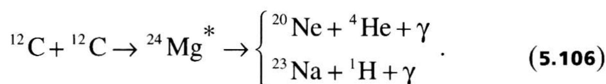
$$^{16}O + {}^{4}He \rightarrow {}^{20}Ne + \gamma, \qquad (5.104)$$



$$^{20}Ne + {}^{4}He \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma. \qquad (5.105)$$

Žvaigždės šerdies struktūra primena svogūno lukštus – vidury yra magnio rutulys, jį supa neono apvalkalas, po to deguonies, po to anglies apvalkalai.

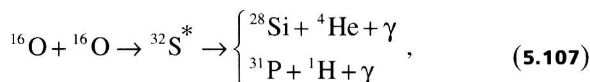
Kai temperatūra žvaigždės šerdyje pasiekia 500–700 mln. K, prasideda termobranduolinis anglies degimas:



$$^{12}C+{}^{12}C\rightarrow{}^{24}Mg^{*}\rightarrow\begin{cases}{}^{20}Ne+{}^{4}He+\gamma\\{}^{23}Na+{}^{1}H+\gamma\end{cases}. \qquad (5.106)$$

Čia $^{24}Mg^{*}$ yra sužadintas magnio izotopo branduolys, kuris greitai skyla dviem nurodytais būdais. Ši reakcija vyksta esant palyginti mažam tankiui ir nedegeneruotoje medžiagoje. Reakcijoje išskiriama 13,93 MeV energija. Susidarę (**5.106**) reakcijose helionai ir protonai iš karto reaguoja su ^{12}C, ^{16}O, ^{20}Ne, ^{23}Na branduoliais ir šių reakcijų produktais.

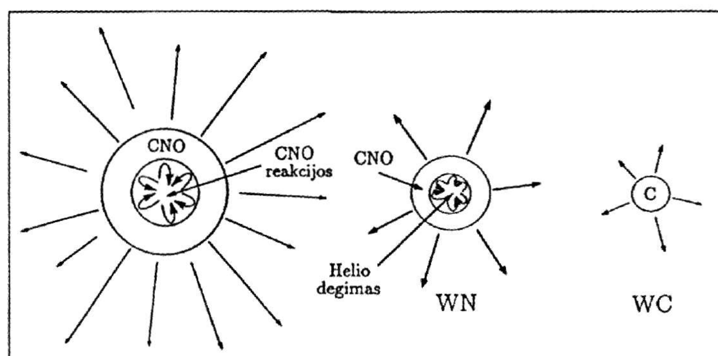
Kai temperatūra pasiekia 2 mlrd. K, prasideda termobranduolinė deguonies degimo reakcija:



$$^{16}O+{}^{16}O\rightarrow{}^{32}S^{*}\rightarrow\begin{cases}{}^{28}Si+{}^{4}He+\gamma\\{}^{31}P+{}^{1}H+\gamma\end{cases}, \qquad (5.107)$$

išskirianti 16,54 MeV energiją.

Visose šiose reakcijose energijos pagaminama tiek daug, kad ji nesuspėja pasiekti paviršiaus ir būti išspinduliuota į erdvę. Dėl to temperatūra žvaigždės viduje vis kyla. Milijardų kelvinų temperatūroje vyksta daugybė reakcijų branduolinės statistinės pusiausvyros sąlygomis. Jose dalyvauja įvairių jau susidariusių elementų branduoliai ir protonai, neutronai, helionai ir gama fotonai. Po visų šių reakcijų susidaro geležies ir jos kaimyninių atomų periodinėje elementų sistemoje branduoliai, kurie turi didžiausią jungties energiją tarp branduolį sudarančių nuklonų. Norint iš geležies izotopo ^{56}Fe pagaminti sunkesnį elementą, reikia išeikvoti daugiau energijos negu jos pasigamins reakcijos metu. Taigi masyvios žvaigždės centre po aprašyto reakcijų ciklo susidaro geležinė šerdis, apsupta C, N, O, Ne ir kitų lengvųjų elementų



5.44 pav. *Volfo ir Rajė WN ir WC rūšių žvaigždžių susidarymas: a – masyvi žvaigždė dėl stipraus dalelių vėjo netenka savo išorinių sluoksnių; b – žvaigždės paviršiuje pasirodo CNO reakcijų ciklo produktai – azotas ir deguonis: ji tampa WN rūšies objektu; c – kai dėl dalelių vėjo netenkama išorinių WN žvaigždės sluoksnių, paviršiuje pasirodo anglinė šerdis: žvaigždė tampa WC rūšies objektu*

branduolių apvalkalų. Dar arčiau paviršiaus yra helio ir vandenilio apvalkalas. Visi šie procesai 8–50 $M_\odot$ žvaigždėse vyksta raudonosios supermilžinės stadijoje.

Kai pradinė žvaigždės masė >50 $M_\odot$, žvaigždės raidos takas HR diagramoje niekada nepasiekia raudonųjų supermilžinių srities ir pasuka atgal į kairę, nes didelė masės dalis išgaruoja kaip dalelių vėjas. Masės netektis labai didelės masės žvaigždėse yra vienas svarbiausių faktorių, kurie nulemia žvaigždės raidos eigą. O spektrinės klasės žvaigždės pagrindinėje sekoje per vėją netenka 10^{-6}–10^{-7} $M_\odot$ per metus, emisinės O klasės žvaigždės – 10^{-5} $M_\odot$ per metus, o Volfo ir Rajė žvaigždės – 10^{-4}–10^{-5} $M_\odot$ per metus. Kai žvaigždės masė yra 60–100 $M_\odot$, gali išgaruoti net 1/100 $M_\odot$ per metus, t. y. 10 $M_\odot$ per 1000 metų. Aišku, kad tokia masės netektis sukelia rimtus padarinius žvaigždės raidoje.

Vienas tokio stipraus dalelių vėjo padarinių yra tai, kad Saulės cheminės sudėties žvaigždės, pradėjusios savo raidą su mase >25 $M_\odot$, baigia raidą su mase nuo 5 iki 10 $M_\odot$. Tos žvaigždės, kurių pradinė masė buvo 10–25 $M_\odot$, netenka mažiau medžiagos ir lieka masyvesnės negu tos, kurios turėjo didesnę pradinę masę.

Kitas didelės masės netekties padarinys yra tai, kad dėl jos atsiranda galimybė pamatyti žvaigždžių gelmes: kai išgaruoja turtinga vandenilio ir helio atmosfera, mūsų žvilgsniui atsiveria gilesni žvaigždės sluoksniai, kuriuose vyrauja anglis, azotas ir deguonis. Tokia žvaigždė matoma kaip Volfo ir Rajė rūšies objektas (žr. **5.8.1** poskyrį). Kai dėl konvekcijos į paviršių išnešami CNO ciklo produktai, matome WN rūšies žvaigždę, o kai vyrauja $3\,^4\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}\mathrm{C}$ degimo produktai, matome WC rūšies žvaigždę (**5.44** pav.). HR diagramoje WR žvaigždės yra O klasės žvaigždžių rajone, tik kairiau pagrindinės sekos, kur baigiasi labai masyvių žvaigždžių raidos takai. Volfo ir Rajė žvaigždės fazė tęsiasi 0,1–1 mln. m., jomis tampa žvaigždės, kurių pradinė masė yra daugiau negu 30–40 $M_\odot$.

5.23. SUPERNOVOS, NEUTRONINĖS ŽVAIGŽDĖS, PULSARAI, JUODOSIOS BEDUGNĖS

Kai masyvios žvaigždės centre susidaro geležinė šerdis, joje nebevyksta jokios termobranduolinės reakcijos, kurios gamintų energiją. Dėl to šerdis, kurios masė 2–3 $M_\odot$, gravitacijos jėgų veikiama, ima sparčiai trauktis, todėl temperatūra ir toliau kyla. Kai ji pasiekia 5 mlrd. K, šerdyje susidarę labai energingi fotonai ima ardyti (disocijuoti) geležies branduolius į helionus ir neutronus. Tačiau tokios branduolinės reakcijos yra endoterminės, t. y. jų vyksmui suvartojama daug energijos – 2,22 MeV vienam nuklonui. Taigi geležinėje šerdyje atsiranda „šaldytuvas“, kuris sustabdo tolesnį temperatūros

kilimą, ir šerdis staigiai kolapsuoja, t. y. krinta pati į save milžinišku greičiu. Netekę atramos, ima kristi vidun ir išoriniai žvaigždės sluoksniai. Kai geležies branduoliai suskaidomi, besitraukiančioje šerdyje temperatūra vėl ima greitai kilti, kol pasiekia 20 mlrd. K. Tuo metu prasideda protonų ir neutronų reakcijos su elektronais ir pozitronais (URCA procesas):

$$p + e^- \rightarrow n + \nu \, , \quad (5.108)$$

$$n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu} \, . \quad (5.109)$$

Daugybė elektronų ir pozitronų, dalyvaujančių šiose reakcijose, poromis gimsta iš gama fotonų. Kartu vyksta ir kitos neutrinų ir antineutrinų gamybos reakcijos (formulės (**5.96**) ir (**5.98**). Susidarę neutrinai ir antineutrinai beveik nesąveikauja su žvaigždės medžiaga ir ją palieka, per sekundės dalis išsinešdami milžinišką energijos kiekį. Šis naujas „šaldytuvas“ dar pagreitina šerdies kolapsą, vadinasi, ir temperatūros didėjimą.

Kai temperatūra pasiekia 40 mlrd. K, o tankis – 300 000 t/cm^3, šerdis tampa neskaidri neutrinams. Neutrinus ir antineutrinus ima užgrobinėti neutronai ir protonai, t. y. (**5.108**) ir (**5.109**) reakcijos pakeičia kryptį. Tuo pačiu šaldytuvas išsijungia, ir šerdies kolapsas sulėtėja, vėliau ir visai sustoja, kai šerdies tankis pasiekia $3 \cdot 10^{13}$ g/cm^3, o temperatūra – 100 mlrd. K. Visas šerdies kolapsas trunka ne ilgiau kaip sekundę, nes ties maža didelės masės šerdimi yra milžiniški pagreičiai.

Krintantis žvaigždės apvalkalas atsitrenkia į nustojusią trauktis šerdį, labai įkaista, ir jame staiga prasideda lengvų branduolių termobranduolinės reakcijos išskirdamos daug energijos ir sukeldamos milžiniškos jėgos sprogimą. Prie to dar prisideda galinga smūginė banga, kuri nusirita nuo šerdies iki pat viršutinių žvaigždės apvalkalo sluoksnių. Termobranduolinio sprogimo ir smūginės bangos jėga išblaško į erdvę beveik visą žvaigždės apvalkalą. Astronomai stebi ***II rūšies supernovos*** sužibimą. Sprogimo metu žvaigždės šviesis padidėja >20 ryškių, apvalkalas išblaškomas 5000 km/s greičiu, sudarydamas vadinamąjį ***plerioną***, t. y. pilnavidurio sferoido formos ūką. Sprogimo energija siekia 10^{43}–10^{44} J.

Naujausi masyvių žvaigždžių raidos skaičiavimai rodo, kad II rūšies supernovų pavidalu sprogsta visos žvaigždės, kurių pradinė masė yra >8 $M_{\odot}$. Tačiau priklausomai nuo pradinės masės sprogimas įvyksta skirtingose raidos fazėse: kai pradinė masė yra tarp 8 ir 25 $M_{\odot}$, žvaigždė sprogsta raudonosios supermilžinės fazėje, o kai pradinė masė didesnė nei 25 $M_{\odot}$ – mėlynosios supermilžinės fazėje.*

Po supernovos sprogimo lieka maždaug 3 $M_{\odot}$ masės buvusios žvaigždės šerdies liekana, nebeturinti jokių vidinių energijos šaltinių. Kadangi tokio

* Pastarosios supernovos dabar priskiriamos atskirai Ib rūšiai. II rūšies supernovų spektruose stebimos vandenilio linijos, o Ib rūšies supernovų spektruose helio ir deguonies linijos (išsamiau žr. **5.29.3** skirsnelyje).

kūno skersmuo mažas, o masė palyginti didelė, tai jame yra milžiniška gravitacija. Dėl to kūnas spaudžiasi tol, kol sutraiškomi visi atomų branduoliai, o elektronai įspraudžiami į protonus, kurie virsta neutronais (medžiagos neutronizacija):



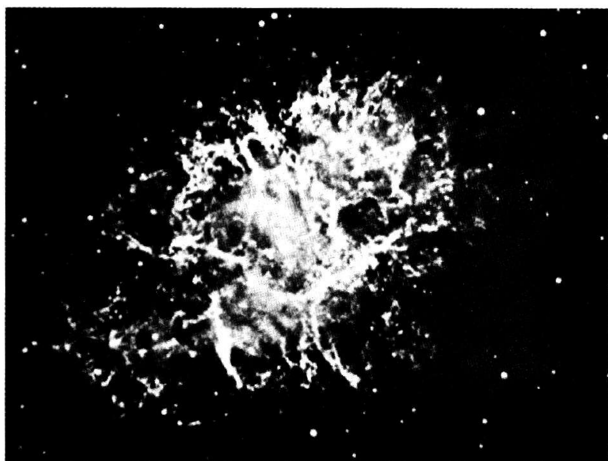
$$p + e^- \rightarrow n + \nu\,. \qquad (5.110)$$

Taip susidaro vadinamoji ***neutroninė žvaigždė*** (angl. *neutron star*), kurios skersmuo yra vos 10–15 km. Beveik visą tokios žvaigždės tūrį užima neutronai, supakuoti iki atomo branduolio tankio, t. y. 10^{14} g/cm^3. Ties centru neutronai gali būti suskilę į kvarkus. Temperatūra centre yra 1 mlrd. K, paviršiuje – apie 10 mln. K. Kadangi paviršius labai mažas, žvaigždė aušta labai lėtai. Neutroninę žvaigždę supa maždaug 1 km storio paviršinis sluoksnis, sudarytas iš geležies atomų branduolių. Pačiame paviršiuje yra kelių metrų storio anglinis, helinis ir protoninis sluoksniai.

Dauguma neutroninių žvaigždžių turi labai stiprius magnetinius laukus (magnetinio srauto tankis 10^7–10^9 T) ir labai greitai sukasi apie ašį – daugumos apsisukimo periodai yra nuo 0,1 iki 10 s. Spinduliuoja visų ilgių elektromagnetines bangas – nuo radijo iki gama. Dalis neutroninių žvaigždžių yra žinomos astronomams kaip radijo, optiniai arba rentgeniniai ***pulsarai*** (angl. *radio, optical, X-ray pulsars*). Iki 2003 m. pradžios buvo atrasta daugiau nei 1000 pulsarų.

Pulsarų spinduliuojamos radijo bangos sklinda statmenai žvaigždės paviršiui siauru kūginiu pluoštu iš abiejų magnetinio lauko polių sričių. Šio spinduliavimo mechanizmas dar turi daug paslapčių, tačiau manoma, kad tai greitų elektronų sinchrotroninis spinduliavimas (žr. **6.7.4.1** skirsnelį), kylantis sąveikaujant labai greitų elektronų srautui ir stipriam magnetiniam laukui. Dėl neutroninės žvaigždės greito sukimosi apie ašį, kuri dažniausiai nesutampa su magnetinio lauko ašimi, pulsarų radijo spinduliavimas užregistruojamas trumpais impulsais, kai bent vienas iš magnetinių polių atsisuka į Žemę. Taigi pulsaro apsisukimo periodas arba lygus radijo impulsų kartojimosi periodui (jei iš Žemės matomas tik vienas magnetinis polius) arba dvigubai ilgesnis (jei matomi pakaitomis abu magnetiniai poliai). Pulsarų apsisukimo periodai, laikui bėgant, dėl išspinduliuojamos energijos po truputį ilgėja: tik ką susidariusi neutroninė žvaigždė sukasi maždaug 100 kartų per sekundę, periodas pailgėja iki 1 s per kelis milijonus metų. Pagal sukimosi periodą ir jo lėtėjimo greitį nustatomas pulsarų amžius. Daugumos pulsarų amžius yra 10^4–10^8 metų.

Jauniausias pulsaras yra Krabo ūko centre, Tauro žvaigždyne (**5.45** pav.). Kaip ir pats Krabo ūkas, ši neutroninė žvaigždė susidarė sprogus II rūšies supernovai, kurios sužibimą 1054 m. užregistravo to meto kronikos. Šio pulsaro radijo impulsai kartojasi kas 0,033 s, taigi neutroninė žvaigždė apsisuka 30 kartų per sekundę. Supernovos sukurtas pulsarą supantis ūkas plečiasi 1200 km/s greičiu.



5.45 pav. *Krabo ūkas Tauro žvaigždyne, 1054 m. sprogusios supernovos likučiai*

Kaip jau minėjome, pulsarai spinduliuoja visų ilgių elektromagnetines bangas. Kai kurie pulsarai ypač stiprūs Rentgeno ir gama spindulių ruožuose. Anksčiau aprašytas radijo bangų sinchrotroninis spinduliavimo mechanizmas iš dalies tinka ir optiniams, ultravioletiniams, Rentgeno ir gama spinduliams. Tačiau trumpesniems spinduliams generuoti reikalingi daug didesnės energijos elektronai ir stipresnis magnetinis laukas.

Iki šiol aptarėme neutronines žvaigždes (pulsarus), kurios susidaro iš pavienių masyvių žvaigždžių, sprogusių kaip II rūšies supernovos. Yra dar kita neutroninių žvaigždžių rūšis – milisekundiniai pulsarai, kurie susidaro sprogus I rūšies supernovoms glaudžiose dvinarėse žvaigždžių sistemose. Šiuos pulsarus aptarsime **5.31** poskyryje. Dauguma milisekundinių pulsarų yra stiprūs Rentgeno spindulių šaltiniai – rentgeniniai pulsarai.

Dar viena įdomi pavienių neutroninių žvaigždžių rūšis yra vadinamieji ***magnetarai*** (angl. *magnetars*). Tai rentgeniniai pulsarai, kurie turi 1000 kartų stipresnius magnetinius laukus negu radijo pulsarai – jų magnetinio srauto tankis yra 10^{11} T. Toks stiprus magnetinis laukas kartais pralaužia geležinę neutroninės žvaigždės plutą ir sukelia minkštųjų gama spindulių žybsnį, kuris trunka 0,5–5 s. Tokie žybsniai kartojasi nereguliariais intervalais.

Pulsarų nuotoliai nuo Saulės gana tiksliai nustatomi pagal vadinamąją radijo bangų dispersiją. Kiekvienas pulsaro radijo bangų impulsas apima tam tikrą radijo bangų intervalą, kuriame visos bangos palieka žvaigždę tuo pačiu laiku. Tačiau radijo bangoms skrodžiant tarpžvaigždines dujas, ilgesnės bangos sklinda šiek tiek lėčiau negu trumpesnės bangos, todėl radijo impulsas mus pasiekia ne vienu laiku – ilgesnės bangos vėluoja. Pagal šio vėlavimo dydį (dispersiją), žinant elektronų tankį tarpžvaigždinėje erdvėje, galima apskaičiuoti, kokio ilgio kelią nuėjo radijo bangos, t. y. pulsaro nuotolį.

Jei supernovos sprogimo liekana turi masę > 3 $M_{\odot}$, vietoje neutroninės žvaigždės susidaro ***juodoji bedugnė*** (angl. *black hole*, pažodžiui – juodoji skylė) arba ***kolapsaras***. Tokio kūno masė yra pakankamai didelė, kad gravitacijos jėgos nugalėtų neutronų ir kitų atomo branduolio dalelių struktūros keliamą pasipriešinimą. Manoma, kad dėl to neutronai ir protonai sutriuškinami į sudedamąsias daleles – kvarkus ir gliuonus. Kas vyksta su medžiaga po to – galima tik spėlioti. Mažėjant žvaigždės dydžiui, gravitacijos jėga paviršiuje vis didėja, kol pabėgimo greitis tampa didesnis už šviesos greitį. Tada buvusi žvaigždė virsta juodąja bedugne. Iš jos nebegali išlėkti nei dalelės, nei elektromagnetinių spindulių fotonai. Aplink bedugnę išlieka gravitacinis laukas, todėl ji gali sudaryti dvinares sistemas su normaliomis žvaigždėmis (žr. **5.31.4** skirsnelį).

Juodąja bedugne gali virsti bet kokios masės kūnas, jei jo spindulys tampa mažesnis už ***gravitacinį*** arba ***Švarcšildo spindulį*** R_g:

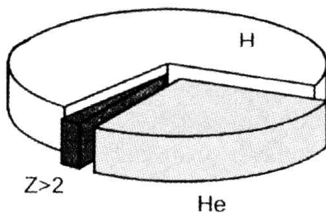
$$R_g = 2G\frac{M}{c^2}\,. \qquad (5.111)$$

Kadangi stebėtojo nepasiekia jokia informacija iš už Švarcšildo spinduliu ribojamo paviršiaus, jis dar vadinamas ***įvykių horizontu*** (angl. *horizont of events*). Saulės masei gravitacinis spindulys yra apie 3 km. Išsamiau apie juodąsias bedugnes bus rašoma **5.31** skirsnyje.

Supernovos yra labai svarbios žvaigždės, dalyvaujančios cheminių elementų branduolių gamyboje. Didesnė dalis sunkesnių už helį elementų, kurie dabar yra Visatoje, buvo pagaminti masyvių žvaigždžių gelmėse ir išsklaidyti tarpžvaigždinėje erdvėje sprogstant supernovoms.

5.24. CHEMINIŲ ELEMENTŲ SINTEZĖ

Pagal šiuolaikinius duomenis, Visata susidarė prieš 13–15 mlrd. m. įvykus vadinamajam ***Didžiajam Sprogimui*** (angl. *Big Bang*). Praėjus 2 minutėms po Didžiojo Sprogimo, 3 min. užtrukusios masiškos branduolinės reakcijos labai pakeitė Visatos pirminę cheminę sudėtį: dalis neutronų virto protonais, kiti su protonais susijungė ir dėl to atsirado helionai (^{4}He) sudarydami 25% visų branduolių masės. Protonams atiteko 75% masės. Buvo susintetinta ir truputėlis deuterio (^{2}D), lengvojo helio izotopo ^{3}He, ličio izotopų ^{6}Li ir ^{7}Li branduolių. Praėjus ~0,5 mln. m. po Didžiojo Sprogimo ir temperatūrai nukritus žemiau 3000 K, elektronai pradėjo rekombinuoti su šiais branduoliais ir sudarė vandenilio, helio ir kitų lengvųjų elementų atomus. Po 250 mln. metų temperatūra nukrito iki 200 K, ir iš šių atomų pradėjo susidarinėti pirmosios žvaigždės. Smulkiau apie šią pirmąją elementų gamybos fazę bus rašoma **9.4** skyriuje.



5.46 pav. *Saulės fotosferos cheminė sudėtis pagal masę. Tokią pat sudėtį turi dauguma Galaktikos disko žvaigždžių*

Natūralu, kad pirmosios žvaigždės buvo sudarytos vien iš vandenilio ir helio su maža ^{2}D, ^{3}He ir ^{7}Li priemaiša. **5.15.2** poskyryje jau buvo minėta, kad deuterio, helio-3 ir ličio branduoliai pradeda reaguoti su vandeniliu ir sudega dar prožvaigždės stadijoje, kai temperatūra besitraukiančiame dujų gniužule pasiekia 1–2 mln. K.

Visų pirmosios kartos žvaigždžių gelmėse, nepriklausomai nuo jų masės, vyko tik protoninės serijos termobranduolinės reakcijos, nes C, N ir O branduolių dar nebuvo. Masyvių pirmosios kartos žvaigždžių gelmėse pasigamino helis, anglis, azotas, deguonis, neonas ir sunkesnieji elementai. Dalis šių elementų pasklido erdvėje su žvaigždžių vėju. Kiti atsidūrė erdvėje žvaigždei baigus savo raidos kelią ir sprogus kaip supernovai. Šie sunkieji elementai išsisklaidė po erdves ir susimaišė su pirmykšte dujų ūkų medžiaga. Susidarant antros kartos žvaigždėms, jos jau turėjo savo sudėtyje ne tik vandenilį ir helį, bet ir sunkesniuosius elementus. Trečios kartos žvaigždės tų elementų turėjo dar daugiau. Taip karta po kartos tarpžvaigždiniai dujų ūkai tapo vis turtingesni cheminių elementų, kol buvo pasiekta Saulės cheminė sudėtis (pagal masę): 74,7% vandenilio, 23,7% helio ir 1,6% kitų cheminių elementų (jų rasta 73) (žr. **5.46** pav.).

Cheminių elementų gausai žvaigždėje išreikšti naudojami keli būdai. Kokio nors elemento su protonų skaičiumi Z atomų kiekio santykis su vandenilio atomų kiekiu išreiškiamas forma $A = \lg N_Z$, kur $N_H = 10^{12}$. Šioje skalėje Saulės cheminė sudėtis apibūdinama tokiais skaičiais: $A_H = 12$, $A_{He} = 10{,}9$, $A_C = 8{,}7$, $A_N = 7{,}9$, $A_O = 8{,}8$, $A_{Fe} = 7{,}6$ ir t. t. (žr. **15**-ąją lentelę knygos pabaigoje). Elementų gausa pagal masę nusakoma skaičiais X, Y ir Z; čia X – vandenilio gausa, Y – helio gausa ir Z – sunkesnių elementų gausa. Visada $X + Y + Z = 1$. Šioje skalėje Saulės $X = 0{,}747$, $Y = 0{,}237$ ir $Z = 0{,}016$. Dažnai Z vadinamas metalų gausa, nors jam didžiausią įtaką turi ne tikri metalai, o anglis, azotas, deguonis ir neonas. Pagaliau kokio nors konkretaus elemento E ir vandenilio gausų santykis žvaigždėje, palyginus su tuo pat santykiu Saulėje, išreiškiamas formule:

$$[E/H] = \lg\ (E/H)_* - \lg\ (E/H)_\odot\ . \qquad (\mathbf{5.112})$$

Šiuo atveju visai nesvarbu, pagal ką imamas santykis – pagal atomų skaičių ar pagal masę. Saulei visada [E/H] = 0, žvaigždės su elemento E trūkumu turės [E/H] < 0, o su pertekliumi [E/H] > 0. Kai elemento gausa mažesnė negu Saulėje 10 kartų, tai [E/H] = –1, kai 100 kartų, [E/H] = –2 ir t. t. Jei žvaigždėje visų sunkesnių už helį elementų kiekis vienodą skaičių kartų mažesnis negu Saulėje, tai žvaigždę galima apibūdinti vienu skaičiumi [E/H]. Kadangi iš spektro lengviausiai nustatoma geležies gausa, tai žvaigždės metalingumui nusakyti daugiausiai naudojamas santykis [Fe/H]. Jeigu įvairių

cheminių elementų gausa žvaigždės atmosferoje nevienodai skiriasi nuo gausos Saulėje, tada naudojami įvairūs santykiai: [C/H], [N/H], [O/H], [Fe/H] ir t. t.

Pažvelgę į elementų gausos pasiskirstymo Saulėje kreivę (**5.47** pav.), matome keletą būdingų požymių. Pirmiausia krinta į akį bendras elementų gausos mažėjimas einant nuo lengvųjų prie sunkiųjų branduolių. Antra, matoma didelė anglies, azoto, deguonies ir neono gausa palyginti su sunkesniais elementais. Trečia – labai maža ličio, berilio ir boro gausa. Ketvirta, matomas aiškus gausos padidėjimas ties $A = 56$, vadinamas „geležies gūbriu" (Fe, Ni, Mn, Cr). Penkta, branduoliai su lyginiu Z turi didesnę gausą negu su nelyginiu Z. Tarp lyginių Z gausiausi tie elementai, kurie turi izotopų su magiškais protonų ar neutronų skaičiais (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126). Ypač paplitę branduoliai su dvigubu magiškumu: ^{4}He, ^{16}O, ^{40}Ca, ^{208}Pb. Dar daugiau dėsningumų aptinkama elementų izotopų gausos pasiskirstyme. Visus šiuos dėsningumus turi paaiškinti atomų branduolių sintezės žvaigždėse teorija.

Tokią teoriją sukūrė 1957 m. Džefris Berbidžas (*G. Burbidge*), Margarita Berbidž (*M. Burbidge*), Viljamas Fauleris (*W. Fowler*) ir Fredas Hoilis (*F. Hoyle*). Sutrumpintai ji vadinama BBFH teorija. Nors per praėjusį laikotarpį branduolinė astrofizika labai sparčiai progresavo, bendri minėtos teorijos principai pasitvirtino ir išliko nepakitę. BBFH teorija remiasi keliais branduoliniais procesais, kuriuos čia ir apžvelgsime.

Jau pirmosios branduolinės reakcijos, kurios užsidega žvaigždžių gelmėse, joms pasiekus pagrindinę seką, veda prie branduolių sintezės: protoninėje reakcijų serijoje, degant vandeniliui, susidaro helis, o CNO cikle didelė anglies ^{12}C dalis virsta azotu ^{14}N, smarkiai sumažėja ^{12}C/^{13}C santykis. Helio degimo reakcijose raudonosiose milžinėse iš ^{4}He susidaro ^{12}C, o α ***proceso*** reakcijose taip pat ^{16}O, ^{20}Ne ir ^{24}Mg. Termobranduolinėse anglies degimo reakcijose, kurios vyksta didelės masės žvaigždėse, susidaro ^{20}Ne, ^{23}Na ir ^{24}Mg, o jų reakcijose su ^{4}He ir ^{1}H – daug vidutinės masės elementų izotopų. Termobranduolinėse deguonies degimo reakcijose susidaro ^{28}Si, ^{31}P, ^{32}S ir jų reakcijų su ^{4}He , ^{1}H , neutronais ir fotonais produktai. Šių reakcijų, vykstančių statistinės pusiausvyros sąlygomis (angl. *equilibrium* arba ***e procesas***), susidaro geležies ir gretimų elementų branduoliai. Statistinė pusiausvyra reiškia, kad, vykstant įvairioms branduolinėms reakcijoms, daugiausia susidaro tų branduolių, kurie yra pastoviausi, t. y. turi didžiausią jungties energiją. Tuo paaiškinama didesnė gausa tų elementų, kurių atominis numeris Z yra lyginis, kurie turi izotopų su magiškais protonų ar neutronų skaičiais, taip pat didelė geležies aplinkos elementų gausa. Nors kolapso metu prieš sprogstant supernovai daug *e* procese susidariusių branduolių vėl suyra, bet jų pakankamai lieka, ir jie sudaro geležies gūbrį, matomą **5.47** pav.

Didesnės masės branduoliams pagaminti reikalingi neutronai, kuriuos lengvai užgrobia geležies gūbrio elementai. Po vieno ar kelių neutronų užgrobimų susidaro sunkieji tų pačių elementų izotopai. Kai neutronų jau per daug,

toks izotopas yra β-radioaktyvus, t. y. jo branduolyje neutronas virsta protonu išmesdamas elektroną ir antineutriną. Taip susidaro gretimo periodinės sistemos elemento izotopas, kuris vėl gali užgrobti neutroną. Taip branduolių statyba tęsiasi iki pačių sunkiųjų. Skiriami du neutroninių reakcijų tipai – lėtasis (angl. *slow* – *s*) ir greitasis (angl. *rapid* – *r*). Pirmajame, arba ***s procese***, neutronai gaminami pamažu, jų srautas mažas. Užgrobus vieną neutroną, branduolyje įvyksta radioaktyvaus virsmo kitu elementu aktas dar prieš tai, kai branduolys užgrobs naują neutroną. Antrajame, arba ***r procese***, neutronų srautas esti labai stiprus, ir kiekvienas branduolys vieną po kito užgrobia daug neutronų, ir tik po to prasideda jų β-radioaktyvumo virsmų grandinėlė. ***s*** proceso neutroninėse reakcijose susidaro lengvieji sunkiųjų elementų izotopai, o ***r*** proceso reakcijose – sunkieji jų izotopai.

Neutronų šaltinis, reikalingas *s* procesui vykti, mažos ir vidutinės masės žvaigždėse, yra ši reakcija, vykstanti raudonųjų milžinių gelmėse:

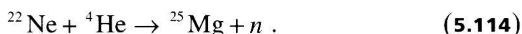


$$^{13}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O + n . \qquad (5.113)$$

5.47 pav. *Cheminių elementų izotopų gausa Saulės fotosferoje. Vandenilio gausa priimta 10^{12}*

Ji vyksta ties išorine helinės šerdies riba, kur helis turi sąlytį su ^{13}C, susidariusiu CNO ciklo reakcijose. Kartu vyksta lėtos laiko skalės neutronų užgrobimo reakcijos ir sunkiųjų elementų gamyba. Po to įvyksta helio žybsnys ir medžiagos drumstis tarp išorinių šerdies sluoksnių, vandenilio degimo zonos ir pirminės cheminės sudėties sluoksnių, dar nepaliestų vandenilio degimo. Į šiuos sluoksnius patenka turtinga ^{12}C medžiaga iš šerdies ir sunkieji elementai, pagaminti *s* procese. Konvekcijos srovės šiuos elementus perneša aukštyn, ir jie pasirodo žvaigždės paviršiuje. Taip susidaro anglingosios R spektrinės klasės, baringosios ir cirkoningosios raudonosios milžinės. Tarp *s* proceso produktų yra ir elementas technecis, kurio visi izotopai radioaktyvūs ir turi skilimo pusėjimo trukmę <2,6 mln. m. Technecis randamas cirkoningųjų žvaigždžių fotosferose. Normalių K ir M milžinių ir supermilžinių fotosferose CNO ciklo degimo produktų pasirodymas paviršiuje sukelia anglies izotopų gausos santykio ^{12}C/^{13}C sumažėjimą nuo ~90 iki ~4.

Kita vidutinės masės žvaigždėse vykstanti reakcija, kurioje susidaro laisvi neutronai, yra



$$^{22}\mathrm{Ne} + {}^{4}\mathrm{He} \rightarrow {}^{25}\mathrm{Mg} + n\,. \qquad (5.114)$$

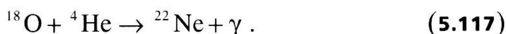
Ji vyksta žvaigždėms esant asimptotinėje milžinių sekoje. Jau minėjome, kad šios žvaigždės turi du sluoksninius energijos šaltinius – išoriniame sluoksnyje dega vandenilis, o vidiniame sluoksnyje – helis. Helis dega žybsniais, pasikartojančiais kas 1000–10 000 m. Neutronų gamybai reikalingas ^{22}Ne susidaro iš CNO ciklo produkto ^{14}N, kuris žybsnio metu susimaišo su sluoksniu, kuriame dega helis:



$$^{14}\mathrm{N} + {}^{4}\mathrm{He} \rightarrow {}^{18}\mathrm{F} + \gamma\,, \qquad (5.115)$$



$$^{18}\mathrm{F} \rightarrow {}^{18}\mathrm{O} + e^{+} + \nu\,, \qquad (5.116)$$



$$^{18}\mathrm{O} + {}^{4}\mathrm{He} \rightarrow {}^{22}\mathrm{Ne} + \gamma\,. \qquad (5.117)$$

(**5.113**) reakcija gali vykti tik 300–350 mln. K temperatūroje, kuri pasiekiama konvekcinio apvalkalo apačioje helio žybsnio metu tik tose žvaigždėse, kurių masė $>3\,M_{\odot}$, o šviesis $M_{\mathrm{bol}} \approx -6$. Susidariusius neutronus užgrobia geležies gūbrio branduoliai, ir *s* procese pasigamina pačių masyviausių stabilių elementų branduoliai iki švino ir bismuto. Po to apvalkalo konvekcinės srovės išneša helio degimo, CNO proceso ir *s* proceso produktus į paviršių. Taip paaiškinamas anglingųjų N spektrinės klasės žvaigždžių ir baringųjų supermilžinių atsiradimas. Šių žvaigždžių atmosferose gausu anglies ir sunkiųjų metalų, pagamintų *s* procese, ypač bario ir stroncio. Po to žvaigždžių vėjas ir planetiškieji ūkai didelę dalį šių elementų išneša į tarpžvaigždinę erdvę.

Didelis ^{7}Li kiekis, randamas anglingųjų žvaigždžių fotosferose, atsiranda suirus radioaktyviam ^{7}Be, kuris pasigamina $^{4}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{He} \rightarrow {}^{7}\mathrm{Be} + \gamma$ reakcijų metu asimptotinėje sekoje ir išnešamas į paviršių konvekcijos.

Sunkiųjų elementų gamyba *r* procese užgrobiant neutronus vyksta supernovose. Stiprus neutronų srautas supernovos sprogimo metu kyla iš dviejų šaltinių. Pirma, plintantis neutronų srautas susidaro aplink atsiskiriančią nuo išsisklaidančio apvalkalo neutroninę žvaigždę. Antra, dėl smūginės bangos įkaista helio sluoksnis ir sužadinama (**5.114**) reakcija. Neutronus užgrobia geležies gūbrio branduoliai, sudarydami nepaprastai turtingus neutronų sunkiuosius elementų izotopus, kurie po grandinėlės β-radioaktyvumo virsmų tampa sunkesnių elementų stabilių izotopų branduoliais. Kartu su supernovos apvalkalu susidarę sunkieji elementai patenka į tarpžvaigždinę erdvę ir ten pamažu susimaišo su pirmykšte ūkų medžiaga, praėjusia panašų procesą ankstesniųjų kartų supernovose. Tuo būdu vyksta tarpžvaigždinės medžiagos turtinimas, ir vėliau susidariusios žvaigždės dėl to turi daugiau sunkiųjų elementų.

Dar vienas branduolių procesų tipas, vykstantis ne žvaigždėse, bet tarpžvaigždinėje medžiagoje arba prožvaigždiniame ūke, yra atplėšimo reakcija, kai didelės energijos (>20 MeV) kosminių spindulių protonai išmuša iš C, N, O, Fe ir kitų elementų branduolių helio, ličio ir kitų lengvųjų elementų branduolius. Taip paaiškinamas didelis ličio, berilio ir boro kiekis prožvaigždžių atmosferose ir prosauliniame ūke, iš kurio susidarė planetos.

5.25. ŽVAIGŽDŽIŲ SPIEČIAI – RAIDOS VEIDRODIS

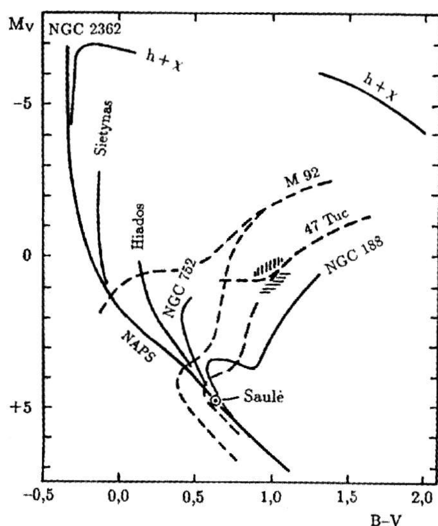
Žvaigždžių raidos teorijoms patikrinti ypač svarbūs žvaigždžių spiečiai. Yra dvi žvaigždžių spiečių rūšys – padrikieji ir kamuoliniai. Plačiau apie juos bus rašoma skyriuje apie Galaktiką (žr. **7.7** poskyrį). Čia aptarsime tik spiečių raidą. Padrikųjų spiečių amžius apima platų intervalą – nuo kelių milijonų iki kelių milijardų metų. Kamuolinių spiečių amžius yra didesnis nei 10 mlrd. m. Kadangi visi konkretaus spiečiaus nariai turi vienodą nuotolį ir vienodą amžių, tai spiečiaus žvaigždžių išsidėstymas HR diagramoje atspindi skirtingos masės žvaigždžių raidą.

5.48 paveiksle parodyta M_V, $B-V$ diagrama, kurioje schematiškai pavaizduotos įvairaus amžiaus padrikųjų spiečių sekos – nuo jauniausių NGC 2362 ir h + χ Per, kurių amžius yra <10 mln. m., iki vieno seniausių – NGC 188, kurio amžius yra ~7 mlrd. m. Diagrama rodo, kad NGC 2362 turi beveik visą nulinio amžiaus pagrindinę seką, tik pačios karščiausios (t. y. masyviausios) O klasės žvaigždės viršutinėje pagrindinės sekos dalyje yra truputį nukrypusios į dešinę, o tai reiškia, kad jose vandenilis baigia degti centre ir degimas pereina į sferinį sluoksnį. Truputį senesnio h + χ Per spiečiaus masyvios B klasės žvaigždės yra jau daugiau nukrypusios, o dalis pačių masyviausių buvusių O klasės žvaigždžių jau yra virtusios raudonosiomis M klasės supermilžinėmis, kai vandenilio degimas visiškai perėjo į sferinį sluoksnį, o centre galbūt jau dega helis. Dar senesnio Sietyno (Plejadų) spiečiaus

(amžius 80 mln. m.) žvaigždės nukrypusios nuo nulinio amžiaus sekos jau daug žemiau, ties B6 poklasiu. Visos buvusios masyvesnės spiečiaus žvaigždės jau praėjo raudonųjų supermilžinių stadiją ir virto baltosiomis nykštukėmis arba neutroninėmis žvaigždėmis. Rojaus Darželio (Hiadų) spiečiaus amžius yra 500 mln. m., todėl jo žvaigždės nukrypsta nuo pagrindinės sekos dar žemiau – ties A2 spektrine klase. Šis spiečius turi keturias raudonąsias milžines, kuriomis tapo masyvesnės spiečiaus žvaigždės, kai jose vandenilio degimas perėjo į sferinį sluoksnį. Dar senesnis spiečius yra NGC 752, turintis 2 mlrd. m. amžių. Jo žvaigždės nukrypsta nuo nulinio amžiaus sekos jau ties F0 poklasiu, o spiečiuje yra 8 raudonosios milžinės.

Reikia paaiškinti, kodėl minėtuose spiečiuose nematome ištisinio žvaigždžių išsidėstymo tarp pagrindinės nulinio amžiaus sekos ir raudonųjų milžinių. Žvaigždžių tankis bet kurioje spiečiaus HR diagramos dalyje priklauso nuo laiko, kurį žvaigždės praleidžia toje dalyje. Jei kurioje nors diagramos vietoje žvaigždžių raida vyksta lėtai, ten matoma jas atitinkačių taškų sankaupa, jei žvaigždės evoliucionuoja greitai, taškų reta. Tarp nukrypusio pagrindinės sekos viršutinio galo ir raudonųjų milžinių raida vyksta palyginti greit (per keletą ar keliasdešimt mln. metų, priklausomai nuo žvaigždės masės), todėl tikimybė aptikti toje diagramos srityje esančią žvaigždę maža. Ši tuštoka HR diagramos dalis tarp A5–G0 spektrinių klasių milžinių su absoliutiniais ryškiais nuo +1 iki –3 vadinama ***Hercšprungo spraga*** (angl. *Hertzsprung gap*).

Dabar pereikime prie senų padrikųjų spiečių, kurių amžius yra ilgesnis negu mūsų Saulės amžius (4,7 mlrd. m), bet trumpesnis už 8 mlrd. m. Tokių spiečių HR diagramos atrodo taip, kaip spiečiaus NGC 188 diagrama, parodyta **5.48** pav. Tokiuose senuose spiečiuose nulinio amžiaus pagrindinėje sekoje likusios tik tos žvaigždės, kurių spektriniai poklasiai vėlyvesni už F2–F5. Nuo tos vietos spiečiaus seka kyla į viršų ir tuoj staigiai suka į dešinę pereidama į raudonųjų submilžinių ir milžinių seką. Senųjų spiečių HR diagramose matoma visa nepertraukiama seka nuo nulinio amžiaus sekos iki pat milžinių sekos viršūnės, nes tokios masės



5.48 pav. *Schematinė keleto padrikųjų spiečių ir dviejų kamuolinių spiečių (M92 ir 47 Tuc) M_V, B–V diagrama. Vertikaliai brūkšniuota sritis – Hiadų raudonosios milžinės, horizontaliai brūkšniuota sritis – spiečiaus NGC 752 raudonosios milžinės. NAPS – nulinio amžiaus pagrindinė seka*

(maždaug 1 $M_{\odot}$) žvaigždės evoliucionuoja daug lėčiau. Senuose padrikuosiuose spiečiuose gerai matoma raudonųjų milžinių sankaupa (RMS) ties $M_V = 0{,}5–1{,}0$ ir $B–V = 1{,}0$ (**5.49** pav.), į kurią peršoka raudonosios milžinės šerdyje pradėjus degti heliui.

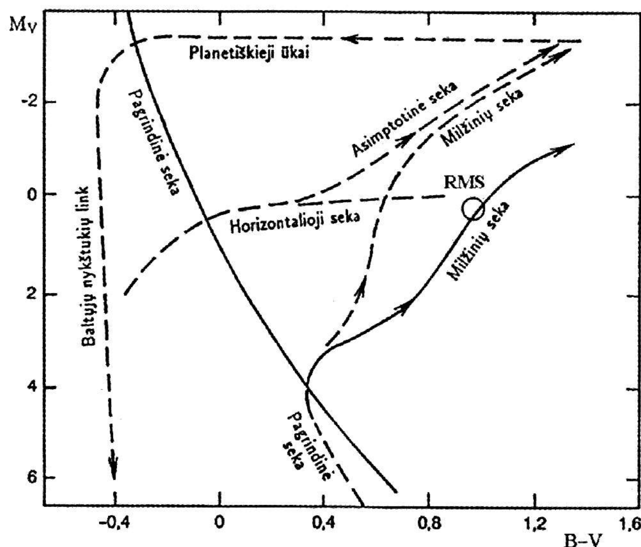
5.48 paveiksle matyti, kad karščiausių spiečiaus pagrindinės sekos žvaigždžių $B–V$ spalvos rodiklis gali būti naudojamas spiečiaus amžiui įvertinti. Seniems padrikiesiems spiečiams, taip pat kamuoliniams spiečiams (žr. **7.7** poskyrį) toje vietoje pagrindinė seka tarsi pasisuka ir pereina į submilžinių ir milžinių seką. Dėl to ši HR diagramos pagrindinės sekos vieta vadinama ***posūkio tašku*** (angl. *turn-off point*).

5.26. NEMETALINGŲJŲ ŽVAIGŽDŽIŲ RAIDOS YPATYBĖS

Nemetalingosios žvaigždės susidarė tada, kai Galaktikos dujų ūkuose buvo dar mažai sunkiųjų elementų. Statistiškai galime manyti, kad kuo žvaigždė turi mažiau metalų, tuo ji senesnė. Nustatyta, kad visos žvaigždės, kurių [Fe/H] < –1.0, susidarė prieš 10–13 mlrd. m. Kadangi Saulės masės žvaigždžių raida nuo nulinio amžiaus pagrindinės sekos iki baltųjų nykštukių trunka apie 10 mlrd. m., tai galima manyti, kad visos nemetalingosios žvaigždės, kurių masė >1 $M_{\odot}$, jau yra virtusios baltosiomis nykštukėmis, neutroniniais kūnais arba juodosiomis bedugnėmis. Tai patvirtinta stebėjimų rezultatais, nes visos seniausios žvaigždės Galaktikos sferoide ir kamuoliniuose spiečiuose turi mases <0,8 $M_{\odot}$.

Tokių nemetalingų mažos masės žvaigždžių raidos takai HR diagramoje yra parodyti **5.49** pav. Senos mažų masių žvaigždės (<0,6 $M_{\odot}$) vis dar yra pagrindinėje (subnykštukių) sekoje, t. y. jų centruose jau 10 mlrd. m. dega vandenilis. Masyvesnės žvaigždės jau yra nukrypusios nuo pagrindinės sekos, o pačios masyviausios (~0,8 $M_{\odot}$) HR diagramoje sudaro submilžinių ir milžinių seką, jų centruose yra besitraukianti helinė šerdis, apsupta sferinio sluoksnio, kuriame dega vandenilis. Raida išilgai milžinių sekos yra palyginti trumpa ir trunka vos 250 mln. m. Kai žvaigždė pasiekia milžinių sekos viršūnę, įvyksta helio žybsnys, t. y. centre pradeda degti helis.

Kaip minėjome **5.19** poskyryje, Saulės cheminės sudėties žvaigždė po to peršoka žemyn į raudonųjų milžinių sankaupą, kuri **5.49** pav. pažymėta ratuku. Nemetalingosios žvaigždės elgiasi skirtingai – centre užsidegus heliui, buvusi raudonoji milžinė peršoka ant horizontaliosios sekos, kuri eina maždaug $M_{bol} = 0$ lygyje nuo karščiausių žvaigždžių iki ~5000 K arba spektrinės klasės G5 (**5.49** pav.). Priklausomai nuo žvaigždės masės peršokusi žvaigždė atsiranda skirtingose horizontaliosios sekos vietose. Jeigu būdama raudonąja milžine dėl dalelių vėjo žvaigždė neteko ~0,1 $M_{\odot}$ masės, tai po helio žybsnio ji patenka į raudonąjį horizontaliosios sekos galą. Kuo daugiau masės nete-

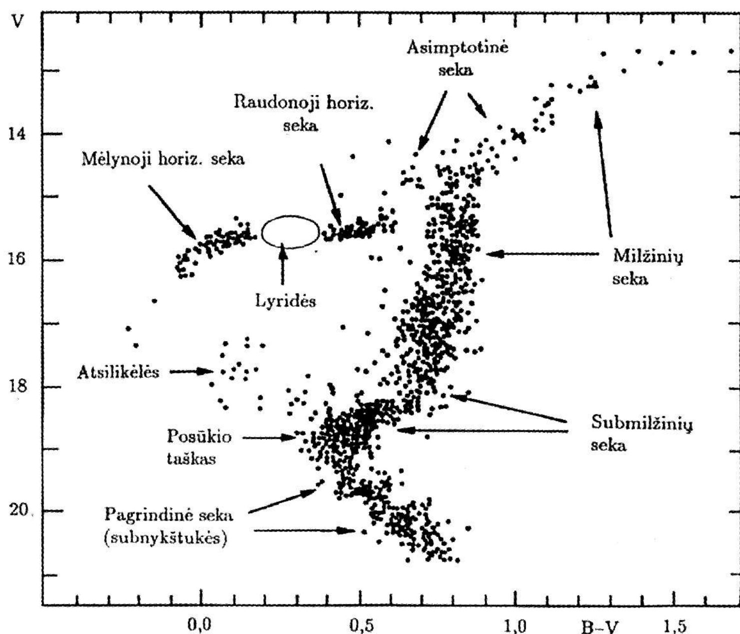


5.49 pav. *Saulės masės žvaigždžių raidos takai nuo pagrindinės sekos iki baltųjų nykštukių. Ištisinė pagrindinė seka ir ištisinis takas milžinių link atitinka Saulės cheminės sudėties žvaigždę. Brūkšniuotos sekos atitinka nemetalingąją žvaigždę. Apskritimu pažymėta raudonųjų milžinių sankaupa (RMS)*

ko žvaigždė, tuo toliau nuo milžinių sekos ji nutolsta. Jei žvaigždė neteko 0,3 $M_\odot$, tai likusi masė yra vos 0,5 $M_\odot$, ir tokia žvaigždė atsiduria mėlynajame horizontaliosios sekos gale. Visos žvaigždės, esančios horizontaliojoje sekoje, degina helį šerdyje, o vandenilį – sferiniame sluoksnyje.

Kai helis šerdyje baigiasi, jo degimas pereina į sferinį sluoksnį, ir tada žvaigždė turi du sluoksninius energijos gamybos šaltinius – vidinį sluoksnį, kuriame dega helis, ir išorinį, kuriame dega vandenilis. Žvaigždė pereina į asimptotinę seką, po to antrą kartą tampa raudonąja milžine, dar vėliau – nusimeta išorinius sluoksnius (planetiškąjį ūką) ir tampa baltąja nykštuke. Tokia nemetalingosios žvaigždės raida kokybiškai nesiskiria nuo Saulės cheminės sudėties ir Saulės masės žvaigždžių raidos, aprašytos **5.19** poskyryje. Be abejonės, yra nemaža smulkių skirtumų, priklausančių nuo helio ir metalų gausos.

Aprašytąją nemetalingųjų žvaigždžių raidos schemą patvirtina kamuolinių spiečių HR diagramos (**5.48** ir **5.50** pav.), kuriose matoma pagrindinė seka iki posūkio taško, submilžinių ir milžinių seka, horizontalioji seka ir asimptotinė seka. Milžinių sekos statumas ir padėtis įvairiuose kamuoliniuose spiečiuose šiek tiek skiriasi, ir tai susiję su sunkiųjų elementų gausa – kuo spiečiaus žvaigždės turi mažiau metalų, tuo jų raudonųjų milžinių seka yra statesnė, jos viršūnės žvaigždės turi didesnį šviesį, o pati seka pasislinkusi į mėlynąją pusę. Kitas labai ryškus skirtumas tarp įvairių kamuolinių spiečių



5.50 pav. *Kamuolinio spiečiaus M3 V, B–V diagrama. Kiekvienas taškas žymi atskirą žvaigždę. Spiečiaus amžius – apie 13 mlrd. m.*

yra jų horizontaliosios sekos išvaizda. Kai kurių spiečių, kaip M3 (**5.50** pav.), žvaigždės išsidėsčiusios po visą horizontaliąją seką nuo jos mėlynojo iki raudonojo galo. Kiti spiečiai, kaip 47 Tuc, turi tik raudonąją horizontaliosios sekos dalį. Yra ir tokių spiečių, kurie turi tik mėlynąją tos sekos dalį, kaip M13. Šie skirtumai paaiškinami kamuolinių spiečių amžiaus skirtumais, kurie siekia 2–3 mlrd. m.: kuo horizontalioji seka turi daugiau karštų mėlynų žvaigždžių, tuo spiečiai jaunesni. Nuo spiečiaus cheminės sudėties ir nuo amžiaus kinta dar ir pagrindinės sekos posūkio taško padėtis. Žvaigždžių pasiskirstymui išilgai horizontaliosios sekos, be spiečiaus amžiaus, dar turi įtakos helio ir CNO elementų gausa, sukimosi greitis ir kitos priežastys.

Kamuoliniuose ir senuose padrikuosiuose spiečiuose pasitaiko žvaigždžių, kurios HR diagramose yra pagrindinėje sekoje aukščiau posūkio taško. Tai vadinamosios ***atsilikėlės*** (angl. *blue stragglers*). Tokios žvaigždės yra lyg ir atsilikusios savo raida, nes jos yra masyvesnės už posūkio taško žvaigždes ir ten jų neturi būti. Kol kas šių žvaigždžių prigimtis nėra visiškai aiški. Dalis jų gali būti glaudžios dvinarės žvaigždės su medžiagos srautu iš vieno nario į kitą, keičiančiu raidos eigą.

Keletas duomenų apie masyvių nemetalingųjų žvaigždžių raidą. Teoriniai skaičiavimai rodo, kad didelės masės žvaigždėse vėjo stiprumas labai priklauso nuo atmosferos metalingumo. Esant mažam metalingumui, medžiaga

„garuoja“ palyginti silpnai, ir dėl to labai didelės masės žvaigždės lengviau išlaiko savo masę. Pavyzdžiui, esant [Fe/H] = –1, pradinės masės 60 $M_\odot$ žvaigždė baigia savo evoliuciją kaip 40 $M_\odot$, o iš 100 $M_\odot$ lieka 30 $M_\odot$. **5.22** poskyryje išsiaiškinome, kad visos 40–120 $M_\odot$ Saulės cheminės sudėties žvaigždės tampa 5–10 $M_\odot$ Volfo ir Rajė žvaigždėmis. Iš nemetalingųjų žvaigždžių WR žvaigžde tampa tik tos, kurių pradinė masė >65 $M_\odot$. Be to, WR fazė trunka gerokai trumpiau – vos 200–300 tūkst. m.

Mūsų Galaktikoje tokių masyvių nemetalingųjų žvaigždžių seniai nebeliko, bet yra galaktikų, kuriose yra daug mažiau metalų negu mūsiškėje, ir masyvių žvaigždžių susidarymas tebevyksta. Tokios galaktikos, pavyzdžiui, yra Didysis ir Mažasis Magelano Debesys. Kadangi nemetalingosios žvaigždės, prieš tapdamos supernovomis, turi daug didesnes mases, yra didesnė tikimybė po sprogimo susidaryti juodajai bedugnei.

5.27. RAUDONŲJŲ NYKŠTUKIŲ EVOLIUCIJA. RUDOSIOS NYKŠTUKĖS

Raudonosiomis nykštukėmis vadinamos žvaigždės, kurių masės, šviesiai, skersmenys ir temperatūros yra mažesni negu Saulės. Dauguma jų – tai pagrindinės sekos žvaigždės, kurių centruose dega vandenilis protoninės serijos branduolinėse reakcijose. Teorija numato, kad jų gravitacinės trauksmos laikas yra labai ilgas: 100 mln.–1 mlrd. m. Dėl to kai kurios raudonosios nykštukės dar nėra pasiekusios pagrindinę seką, t. y. jų centruose dar nevyksta branduolinės reakcijos. Raudonosios nykštukės, kurios jau pasiekė pagrindinę seką ir kurių masės >0,3 $M_\odot$, susideda iš šerdies, kurioje dega vandenilis, vidinės sferinės zonos su spinduline energijos pernaša ir konvekcinio apvalkalo (žr. **5.40** pav.). Mažesnės masės raudonosiose nykštukėse energijos pernaša iš gelmių į paviršių vyksta tiktai konvekcijos būdu.

Pagrindinėje sekoje 1 $M_\odot$ masės nykštukė turi išbūti apie 10 mlrd. m., o 0,1 $M_\odot$ masės – 100 mlrd. m. Taigi visos tokių masių žvaigždės, susidariusios vėliau negu prieš 10 mlrd. m., dar yra pagrindinėje sekoje. Tik seniausios Galaktikos žvaigždės, kadaise buvusios raudonosios nykštukės su masėmis 0,7–0,8 $M_\odot$, jau yra nukrypusios nuo pagrindinės sekos ir sudaro submilžinių ir milžinių seką.

Jei prožvaigždės masė gravitacinės trauksmos iš ūko fazėje yra mažesnė negu 0,08 $M_\odot$ (80 Jupiterio masių), ji pasieks pagrindinę seką per 100 mln. m., slinkdama HR diagramoje tiesiai žemyn išilgai konvekcinio tako (**5.35** pav.). Tačiau tokia prožvaigždė niekada netaps tikra žvaigžde. Tokios masės gravitacija yra per silpna, kad žvaigždės centre temperatūra pasiektų 10 mln. K. Mat jos šerdies tankis pasidaro toks didelis, kad medžiaga degeneruoja, o degeneruotų elektronų slėgis lengvai sustabdo tolesnį šerdies traukimąsi. Taigi

gravitacija nebegali toliau didinti šerdies temperatūros, kai ji mažesnė kaip 3–4 mln. K, ir žvaigždė tampa vadinamąja ***rudąja nykštuke*** (angl. *brown dwarf*). Tokios žvaigždės paviršiaus temperatūra niekad nebūna aukštesnė už 3000 K, taigi priklauso naujai įvestoms L ir T spektrinėms klasėms (žr. **5.5** skirsnį). Manoma, kad jų $M_V > 18$, o skersmenys yra tokie pat, kaip ir didžiųjų planetų ($\sim 0{,}1\ R_\odot$). Kai kurios jų tik 13 kartų masyvesnės už Jupiterį.

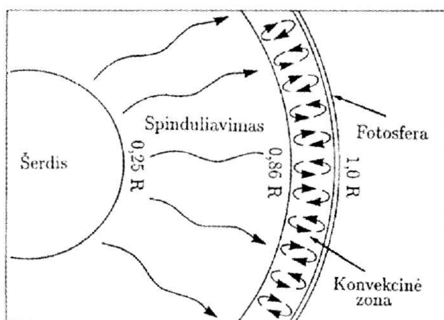
Rudoji nykštukė, perkirtusi HR diagramos pagrindinę seką ir čia neapsistojusi, slenka žemyn, kol pasiekia atvėsusių baltųjų nykštukių seką. Toliau rudoji nykštukė pamažu vėsta, lėtai slinkdama išilgai jos degeneruotos šerdies spindulį atitinkančios linijos. Ši raidos stadija gali trukti iki 10 mlrd. m., kol tokia žvaigždė pasiekia $M_V = 21$. Tokio amžiaus rudųjų nykštukių galima tikėtis rasti tik tarp seniausiųjų Galaktikos žvaigždžių.

5.28. SAULĖS RAIDA

Šiuo metu Saulės absoliutinis ryškis $M_V = +4{,}79$, paviršiaus efektinė temperatūra 5780 K, spalvos rodiklis $B\text{–}V = 0{,}65$, spektrinė klasė G2 V. Šie duomenys rodo, kad nors Saulė dar yra HR diagramos pagrindinėje sekoje, bet jau per 0,3 ryškio nukrypusi aukštyn nuo nulinio amžiaus sekos. Tai reiškia, kad vandenilis tebedega protoninės serijos reakcijose Saulės centre, bet jau nemaža jo dalis yra virtusi heliu.

Pagal Žemės seniausiose uolienose ir meteorituose randamų ilgaamžių radioaktyviųjų urano ir torio izotopų ^{238}U, ^{235}U ir ^{232}Th gausą ir jos santykį su radioaktyvaus skilimo produktų gausa nustatyta, kad Saulės sistema susidarė prieš 4,7 mlrd. m. Kai Saulei sueis 8 mlrd. m., vandenilis jos centrinėje dalyje bus išeikvotas, ir jo degimas pereis į sferinį sluoksnį aplink helinę šerdį. Tuo metu Saulė apleis pagrindinę seką ir pradės didėti tapdama iš pradžių submilžine, o po to – raudonąja milžine. Jos kelias išilgai milžinių sekos truks maždaug 250 mln. m. Saulei plečiantis, jos viduje atsidurs Merkurijus ir bus sunaikintas. Dėl didelio karščio dauguma planetų greičiausiai neteks atmosferų ir dalies paviršinės medžiagos. Kai Saulė pasieks milžinių sekos viršūnę, jos skersmuo bus 150 kartų didesnis už dabartinį skersmenį. Iš Žemės ji bus matoma 75° kampiniu skersmeniu, t. y. jos diskas užims beveik pusę dangaus skliauto.

Įvykus helio žybsniui šerdyje, per milijoną metų Saulė sumažės bent 20 kartų ir peršoks į raudonųjų milžinių sankaupą, kur ji išbus apie 100 mln. m. Kai Saulės centre baigs degti helis, ji vėl išsiplės ir asimptotine seka vėl pakils į raudonąsias milžines. Šį kartą Saulės spindulys bus dar didesnis (iki 175 mln. km), ir viena po kitos bus sudegintos Venera ir Žemė. Po to Saulė nusimes išorinį dujų apvalkalą, ir jos anglinė šerdis virs baltąja nykštuke, aplink kurią liks skrieti tik tolimosios planetos. Tai turėtų įvykti po 5 mlrd. metų.



5.51 pav. *Saulės vidinio modelio pjūvis*

Dabartinės Saulės modelio pjūvis parodytas **5.51** pav. Centre yra didelio tankio zona, užimanti 1/4 spindulio, kurioje dega vandenilis. Saulės centre temperatūra yra 16 mln. K, o tankis 160 g/cm^3, zonos krašte 8 mln. K ir 20 g/cm^3. Toliau seka plati sferinė zona, kurioje vyksta spindulinė energijos pernaša. Ši zona baigiasi ties 0,86 Saulės spindulio, temperatūra toje vietoje yra 500 000 K, o tankis – 0,01 g/cm^3. Toliau iki pat fotosferos tęsiasi konvekcijos zona, užimanti 0,14 spindulio. Fotosferos storis 200–300 km. Fotosferos dugne temperatūra yra 8000 K, o tankis $4 \cdot 10^{-7}$ g/cm^3, fotosferos viršuje – 4500 K ir $3 \cdot 10^{-8}$ g/cm^3.

Kol kas vienintelis praktinis būdas, kaip patikrinti šio modelio teisingumą, yra bandymas užregistruoti neutrinus, kurie susidaro protoninės serijos reakcijose ir be jokių kliūčių apleidžia Saulę. Saulės gelmėse išlaisvinamos kelios tokių neutrinų rūšys: protoniniai neutrinai reakcijoje (**5.72**), beriliniai neutrinai reakcijoje (**5.77**) ir boriniai neutrinai reakcijoje (**5.80**). Be jų, dar yra „pep“ neutrinai, susidarantys vykstant reakcijai



$$p + e^- + p \rightarrow {}^2\mathrm{D} + \nu \,. \qquad (\mathbf{5.118})$$

Visų šių rūšių neutrinai yra nevienodai pasiskirstę pagal energijas: protoninių neutrinų energija yra tarp 0 ir 0,420 MeV, beriliniai ir „pep“ neutrinai turi fiksuotą energiją – atitinkamai 0,861 MeV ir 1,44 MeV, o boriniai neutrinai – tarp 0 ir 14,06 MeV. Pagal teorinius skaičiavimus Saulės gelmėse susidaro 10^{39} neutrinų per sekundę, o jų srautas Žemėje turi būti 10^{11} cm^{-2}s^{-1}. Neutrinams registruoti Žemėje statomi neutrinų „teleskopai“ (žr. **3.5** poskyrį).

Iki šiol įvykdyti Saulės neutrinų registravimo eksperimentai rodo, kad tiek borinių, tiek protoninių neutrinų yra kelis kartus mažiau negu rodo teorija. Tai gali sukelti daug priežasčių. Viena iš jų – Saulės gelmių temperatūros ir tuo pačiu branduolinių reakcijų greičio variacijos. Jei šios variacijos po kurio laiko paveikia Saulės paviršiaus temperatūrą, tai gali būti Žemėje periodiškai pasikartojančių ledynmečių priežastis. Kita neutrinų trūkumo priežastis gali būti elektroninių neutrinų virsmas miuoniniais neutrinais jiems skriejant nuo Saulės iki Žemės.

5.29. KINTAMOSIOS ŽVAIGŽDĖS

Ankstesniuose skyriuose matėme, kad visų be išimties žvaigždžių raidos metu kinta fizinės charakteristikos. Šie evoliucinio pobūdžio žvaigždžių kitimai vyksta taip lėtai, kad per tokį trumpą laiką, kaip žmogaus gyvenimas, jie

dažniausiai nepastebimi, ir žvaigždę galima laikyti stacionaria, t. y. nekintančia. Tačiau yra žvaigždžių, kurių spindesys kinta gana greitai, per metus, dienas ir net valandas. Tai ***kintamosios žvaigždės***, kurių iki šiol atrasta maždaug 30 000.

Visos kintamosios žvaigždės turi specialų žymėjimą, jeigu prieš tai jos nebuvo pažymėtos graikiškomis raidėmis. Pirmosios 334 kiekvieno žvaigždyno kintamosios žvaigždės žymimos didžiosiomis lotyniškomis raidėmis, pradedant nuo R po vieną ir po 2 raides: R, S, ..., Z, RR, RS, ..., RZ, SS, ST, ..., SZ, ..., ZZ, AA, ..., AZ ..., QQ, ..., QZ (raidė J nenaudojama). Po raidės ar raidžių rašoma lotyniška žvaigždyno santrumpa, pvz., T Tau, W Vir, RR Lyr, DQ Her. Kai baigiamos visos raidžių kombinacijos, kintamosios žvaigždės žymimos raide V ir eilės numeriu pradedant 335, pvz., V335 Aql, V1500 Cyg ir t. t.

Pagal priežastis, sukeliančias spindesio kitimą, kintamosios žvaigždės skirstomos į ***užtemdomąsias*** ir ***fizines***. Užtemdosios kintamosios yra dvinarės žvaigždės, kurios narių orbitų plokštuma nukreipta į Žemę briauna, todėl jų nariai periodiškai vienas kitą užtemdo. Šios rūšies žvaigždės bus detaliau aprašytos **5.30.3** poskyryje. Fizinių kintamųjų šviesis kinta dėl fizinių procesų žvaigždės viduje ar paviršiuje. Jos skirstomos į ***pulsuojančias*** (angl. *pulsating*) ir ***sprogimėjančias*** (angl. *cataclysmic*).

5.29.1. Pulsuojančios kintamosios žvaigždės

Šios rūšies žvaigždėms būdingas nuolatinis ir tolygus spindesio kitimas, sukeltas jų išorinių sluoksnių radialinių pulsacijų. Tai reiškia, kad pulsuojant kinta žvaigždės spindulys, bet ji visą laiką išlaiko sferinę formą. Žvaigždei traukiantis, jos spindulys mažėja, paviršiaus temperatūra kyla, ir atvirkščiai. Pulsuojančių žvaigždžių periodai yra tarp kelių valandų ir metų, spindesio kitimo amplitudės nuo šimtųjų ryškio dalių iki 10 ryškių.

Pulsuojančios žvaigždės skirstomos į keletą rūšių, nurodytų **5.2** lentelėje. Prie pulsuojančių taip pat priskiriamos pusiau taisyklingosios žvaigždės, kurių spindesys kinta periodiškai, bet to kitimo periodas ir spindesio kreivės forma nepastovūs. Tai daugiausia M, S ir N spektrinių klasių milžinės, gimingos miridėms. Tarp jų yra ir visai netaisyklingai kintančių žvaigždžių.

Taisyklingai kintančioms žvaigždėms iš stebėjimų galima gauti vidutinę spindesio kitimo kreivę ant ordinačių ašies atidedant žvaigždės ryškį, o ant abscisų ašies – fazę φ. ***Fazė*** yra periodo dalis, praėjusi po spindesio maksimumo momento, taigi kinta nuo 0 iki 1. Žinant bent vieną maksimumo momentą T_0 ir kitimo periodą P, galima apskaičiuoti anksčiau buvusius arba būsimus maksimumų momentus T pagal formulę:

$$T = T_0 \pm P \cdot E \; ; \qquad (5.119)$$

čia E vadinamoji ***epocha***, t. y. praėjęs po T_0 periodų skaičius. Ta pati formulė tinka ir kitoms fazėms.

5.2 lentelė. Pulsuojančių kintamųjų žvaigždžių rūšys

Rūšis	Būdinga atstovė	Periodas d.	Spektrinės klasės	ΔV amplitudė	Metalingumas*
Cefeidės	δ Cep	1–135	F–G I–II	0,05–2,0	M
Virginidės	W Vir	0,8–35	F–G II	0,3–1,2n	M
Lyridės	RR Lyr	0,2–1,2	A–F III	0,2–2,0	M, nM
Skydo Delta	δ Sct	0,01–0,2	A–F V–III	0,01–0,9	M
Fenikso SX	SX Phe	0,04–0,08	A–F sd	0,01–0,7	nM
Heraklio UU	UU Her	10–90	A–F I	0,01–0,3	nM
Tauro RV	RV Tau	30–150	F–G I	2–4	M
Miridės	o Cet	80–1000	M,S,N I–II	2,5–11	M, nM
Pusiautaisyklingosios	α Ori	20–2000	M,S,N I–II	<2,5	M
Netaisyklingosios	CO Cyg	–	M,S,N I–II	<2	M
Cefėjo Beta	β Cep	0,1–0,6	O8–B6 I–V	0,01–0,3	M
Banginio ZZ	ZZ Cet	3–20 min	DA balt. n.	<0,3	–

HR diagramoje dauguma pulsuojančių žvaigždžių sudaro įstrižą juostą, einančią nuo pagrindinės sekos link žemos temperatūros supermilžinių (**5.52** pav.) Ten, kur nestabilumo juosta kerta V–IV–III šviesio klasių juostą, yra Skydo Delta rūšies žvaigždės ir jas atitinkančios nemetalingosios Fenikso SX rūšies žvaigždės. Ten, kur nestabilumo juosta kerta horizontaliąją seką, yra lyridės, arba Lyros RR rūšies žvaigždės, tarp kurių yra tiek metalingų, tiek nemetalingų žvaigždžių. Aukščiau jų supermilžinių srityje yra metalingos cefeidės ir metalų trūkumą turinčios virginidės, arba Mergelės W rūšies žvaigždės. Tauro RV rūšies žvaigždės ir miridės nepriklauso nestabilumo juostai: miridės yra į dešinę nuo raudonosios Hajašio nestabilumo linijos, parodytos **5.52** pav., o Tauro RV rūšies žvaigždės yra tarpinės tarp virginidžių ir miridžių. Nestabilumo juostai nepriklauso ir Heraklio UU rūšies supermilžinės.

Pulsuojančios žvaigždės periodas priklauso nuo vidutinio žvaigždės tankio $\bar{\rho}$. Joms galioja formulė

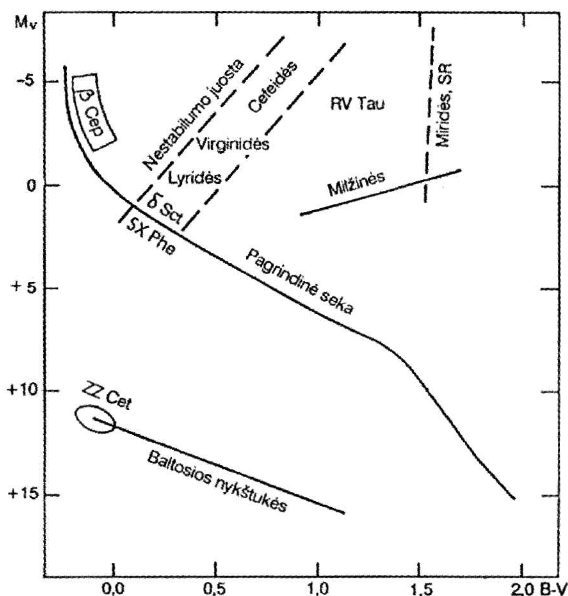
$$Q = P\sqrt{\bar{\rho} / \bar{\rho}_\odot} \, , \qquad (5.120)$$

čia Q yra vadinamoji pulsacijos konstanta. Kadangi $\bar{\rho} = 3M/4\pi\bar{R}^3$, tai

$$Q = P(M / M_\odot)^{\frac{1}{2}} (\bar{R} / R_\odot)^{-\frac{3}{2}} \cdot \qquad (5.121)$$

Pulsacijos gali vykti arba pagrindiniame tone, kurio periodas ilgiausias, arba pirmame obertone, kurio periodas yra 3/4 pagrindinio periodo. Kartais pulsacijos vyksta abiem periodais, tada matomi periodiški žvaigždės amplitudės ir spindesio kreivės formos kitimai, vadinami „mušimais“. Konstanta Q yra

* M – šios rūšies žvaigždžių metalingumas artimas Saulei, nM – nemetalingosios žvaigždės.

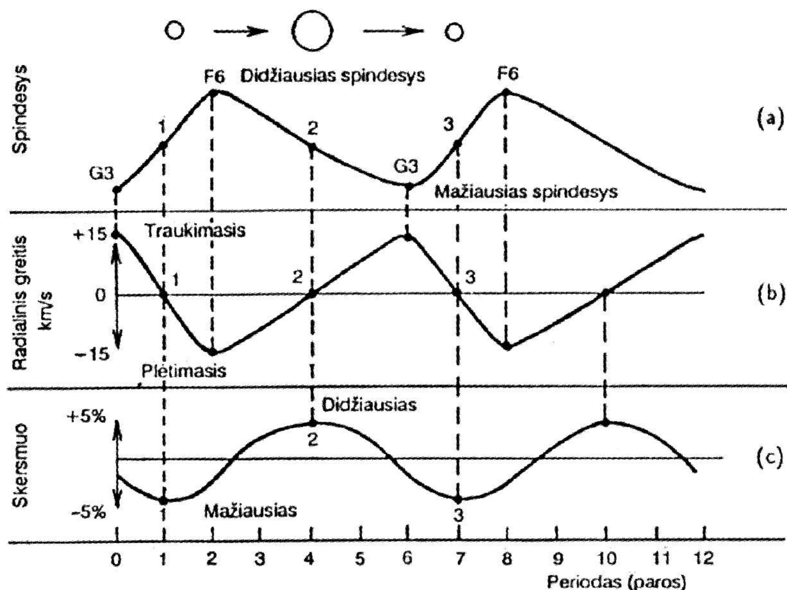


5.52 pav. *Pulsuojančių kintamųjų žvaigždžių padėtys HR diagramoje*

skirtinga pagrindiniam tonui ir kitiems obertonams. Pagrindiniam tonui $Q = 0{,}042$, jei P išreikštas dienomis.

Jei Q žinoma iš anksto, tai, žinant periodą ir žvaigždės spindulį, galima rasti žvaigždės masę. Į (**5.121**) formulę įeinantį žvaigždės vidutinį spindulį galima surasti vadinamuoju Badės ir Veselinko metodu iš pulsuojančios žvaigždės paviršiaus temperatūros ir radialinio greičio kitimų įvairiose fazėse. Nustatyta, kad pulsacijų metu spindulys kinta gana daug: $\Delta R / \bar{R}$ cefeidėms yra iki 27%, virginidėms – iki 40–50%, lyridėms – iki 15%.

Visos pulsuojančių kintamųjų žvaigždžių rūšys atitinka skirtingas žvaigždžių raidos stadijas. **5.52** paveiksle matyti, kad Skydo Delta ir Fenikso SX rūšių žvaigždės atitinka vandenilio degimo centre ir jo išsekimo raidos etapą. Lyridės yra $<1\,M_{\odot}$ masės horizontaliosios sekos žvaigždės, t. y. jų centruose dega helis, o sferiniame sluoksnyje – vandenilis. Cefeidės yra masyvios (3–12 $M_{\odot}$) žvaigždės, esančios analogiškoje raidos stadijoje. Virginidės yra mažų masių ($0{,}8\,M_{\odot}$) asimptotinės sekos žvaigždės, t. y. jų gelmėse yra du sluoksniniai energijos šaltiniai – vandenilio ir helio; žvaigždė ima pulsuoti tada, kai asimptotinės sekos raudonoji milžinė, įvykus helinio sluoksnio žybsniui, nutolsta į kairę ir perkerta nestabilumo juostą. Panašioje raidos stadijoje, matyt, yra ir Heraklio UU rūšies žvaigždės, nutolusios net į A ir F spektrinių klasių rajoną. Tauro RV rūšies žvaigždės yra giminingos virginidėms, bet, matyt, atitinka vėlesnę asimptotinės sekos stadiją, kai vandenilio degimo zona artėja prie žvaigždės paviršiaus. Dar vėlesnė stadija, tiesiogiai



5.53 pav. *Cefeidės δ Cep spindesio, spektrinės klasės, radialinio greičio ir skersmens kitimas*

pereinanti į planetiškojo ūko stadiją, yra miridės. Šios žvaigždės, matyt, jau nebeturi vandenilio degimo zonos. Laikui bėgant, jų pulsavimo periodas ir amplitudė didėja, kol išorinis apvalkalas atsiskiria ir nutolsta.

Geriausiai ištyrinėtos pulsuojančios žvaigždės yra ***cefeidės*** (angl. *cepheid variables*). Būdingos cefeidės Cefėjo δ žvaigždės spindesio, radialinio greičio ir skersmens kitimo kreivės parodytos **5.53** paveiksle. Jame matyti, kad kai žvaigždės spindesys yra didžiausias, temperatūra yra taip pat didžiausia (spektrinė klasė F6), o žvaigždės skersmuo yra vidutinis, tačiau didėja maksimaliu greičiu (spektro linijos labiausiai pasislinkusios į trumpųjų bangų pusę). Kai žvaigždės spindesys yra mažiausias, temperatūra irgi yra beveik žemiausia (spektrinė klasė G3), o skersmuo sparčiausiai mažėja.

Nepaprastai svarbi cefeidžių savybė yra jų vidutinio absoliutinio ryškio $< M_V >$ ir periodo ryšys:

$$< M_V > \; = -1{,}4 - 2{,}8 \lg P. \qquad (\mathbf{5.122})$$

Ši priklausomybė naudojama cefeidžių nuotoliams nustatyti, kai žinomas vidutinis ryškis $< V >$ ir periodas P. Kadangi cefeidės yra didelio šviesio žvaigždės supermilžinės, jos lengvai matomos ne tik mūsų Galaktikoje, bet ir kaimyninėse galaktikose ir yra lyg kilometriniai stulpai Visatos masteliui nustatyti.

Virginidės (angl. *W Virginis type variables*) irgi turi panašią periodo ir šviesio priklausomybę, bet ji turi kitą laisvąjį narį ir kitą polinkį:

$$< M_V > \; = -0{,}1 - 1{,}6 \lg P\ . \qquad (\mathbf{5.123})$$

Ši priklausomybė naudojama kamuolinių spiečių, turinčių virginidžių, nuotoliams nustatyti.

Ne mažiau svarbios žvaigždžių sistemų nuotolių nustatymui yra ***lyridės*** (angl. *RR Lyrae type variables*). Jos esti arba pavienės, arba kamuoliniuose žvaigždžių spiečiuose. Beveik visų lyridžių absoliutiniai ryškiai M_V yra tarp 0,0 ir +1,0, jie šiek tiek priklauso nuo metalingumo:

$$< M_V > = 1{,}0 + 0{,}17\,[\mathrm{Fe/H}]. \qquad (5.124)$$

Nestabilumo juostoje esančios pulsuojančios žvaigždės turi vieningą pulsavimo varomąjį mechanizmą, susijusį su helio jonizacija. Normalių A–F–G spektrinių klasių žvaigždžių fotosferose helis yra neutralioje būsenoje. Pirmoji helio jonizacija įvyksta 25–30 tūkst. K temperatūroje, o antroji jonizacija – 35–60 tūkst. K temperatūroje. Šios temperatūros yra tam tikrame gylyje po fotosfera (iki 0,1 spindulio).

Žvaigždės pulsacijas palaiko helio jono He III, t. y. dukart jonizuoto helio atomai. Žvaigždei susispaudžiant, antrosios helio jonizacijos sluoksnyje tankis didėja, temperatūra kyla, ir prasideda intensyvi He II jonizacija ir jo virtimas helio jonu He III. Šio proceso metu sugeriama energija ir temperatūra didėja lėčiau negu aplinkiniuose sluoksniuose, kur jonizacijos nėra. Dėl padidėjusio tankio ir per mažai padidėjusios temperatūros padidėja iš gelmių einančių spindulių sugerties koeficientas κ. Tada sulaikomas energijos srautas, pakyla temperatūra ir atsiranda impulsas išoriniams žvaigždės sluoksniams plėstis. Jiems plečiantis, sumažėja tankis, nukrinta temperatūra, ir He III rekombinuoja į He II. Žvaigždė išsiplečia, jos išoriniai sluoksniai įgyja potencinės energijos perteklių, po to dėl gravitacijos vėl ima trauktis, ir ciklas kartojasi. Taigi He II jonizacijos sluoksnis veikia lyg šiluminio variklio vožtuvas, kiekviename cikle duodamas impulsą į išorę.

Tankio ir temperatūros sąlygos, reikalingos tokiam He II jonizacijos zonos veikimui, susidaro tik tam tikrų efektinių temperatūrų ir absoliutinių ryškių žvaigždėse. Tuo ir paaiškinama, kodėl žvaigždžių pulsacijos vyksta tik nestabilumo juostoje. Konvekcija išoriniuose sluoksniuose trukdo susidaryti pastoviam helio jonizacijos sluoksniui, todėl pulsuojančios žvaigždės vengia tų HR diagramos vietų, kur vyksta tokia konvekcija. Konvekcijos atsiradimas netgi apibrėžia raudonąją nestabilumo juostos ribą HR diagramoje. Fazių poslinkis tarp spindesio ir radialinio greičio kreivių įvairių tipų pulsuojančioms žvaigždėms esti skirtingas, nes priklauso nuo He II jonizacijos zonos gylio.

Kai kuriais atvejais žvaigždžių pulsacijos mechanizme vožtuvo vaidmenį gali atlikti ir vandenilio jonizacijos, ir helio pirmosios jonizacijos sluoksniai, tačiau jų įtaka daug mažesnė, nes šios cefeidžių ir lyridžių zonos yra per arti paviršiaus, kur mažesnis tankis ir sugerties koeficientas.

5.29.2. Miridės, infražvaigždės ir OH/IR šaltiniai

Miridės yra 1–15 $M_{\odot}$ pradinių masių asimptotinės sekos žvaigždžių raidos stadija. Kai sferinės vandenilio ir helio degimo zonos artėja prie žvaigždės išorinių sluoksnių, vandenilio degimo zona pamažu užgęsta ir lieka tik helio degimo zona, kurioje helis dega kas keli šimtai metų pasikartojančiais įsižiebimais. Tai išjudina raudonosios supermilžinės išorinius sluoksnius, ir jie ima pulsuoti su maždaug 100 dienų periodu palaikomi vožtuvinio jonizacijos mechanizmo, kaip ir cefeidėse. Žvaigždė tampa kintamąja miride*. Jeigu cefeidėse vožtuvo mechanizmas veikia antrosios helio jonizacijos zonoje, tai miridėse tą vaidmenį greičiausiai atlieka vandenilio ir helio pirmosios jonizacijos zonos.

Miridei evoliucionuojant aukštyn išilgai asimptotinės sekos, jos fotosferos temperatūra mažėja, o periodas, amplitudė, skersmuo ir šviesis didėja. 1–3 $M_{\odot}$ pradinės masės asimptotinės sekos žvaigždės pasiekia $M_{\rm bol}$ = –5, o periodas – 500 d. Iš miridžių atmosferų vyksta stiprus medžiagos garavimas – per metus jos netenka 10^{-5}–10^{-6} $M_{\odot}$ masės. Šios medžiagos dalis kondensuojasi į 10–100 nm dydžio magnio ir geležies silikatų dulkeles, kurios kartu su dujomis sudaro miridės apvalkalą. Apvalkalo tankis yra palyginti mažas, todėl jis yra optiškai skaidrus žvaigždės spinduliams. Dulkių apvalkalo buvimą patvirtina silikatų emisijos gūbriai ties 9,7 ir 18 μm, turintys kelių μm plotį ir matomi miridės energijos pasiskirstymo spektre kreivėje. Šiose emisijos juostose yra išspinduliuojama 5–10% visos žvaigždės skleidžiamos energijos.

Kaip jau buvo minėta poskyryje **5.19**, miridės likimas toks: ji nusimeta savo išorinius sluoksnius, kurie išsisklaido erdvėje planetiškojo ūko pavidalu. Miridės vietoje lieka karšta planetiškojo ūko centrinė žvaigždė – buvusi anglinė jos šerdis. Per maždaug 50 000 m. ši žvaigždė virsta baltąja nykštuke.

Didesnės masės (5–15 $M_{\odot}$) miridės keičiasi kiek kitaip. Pirma, jos turi ilgesnius periodus – nuo 500 iki 1800 d. Antra, jų šviesis yra daug didesnis – jų $M_{\rm bol}$ pasiekia –7,5, trečia, visos jos yra infraraudonieji objektai, matomoje spektro srityje skleidžiantys vos kelis procentus energijos, ketvirta, visos jos yra mazerinio OH spinduliavimo šaltiniai. Infraraudonasis spinduliavimas kyla iš dviejų šaltinių. Pirma, pačios žvaigždės fotosferos temperatūra yra <2000 K (žemiausia yra spindesio minimume), ir todėl jos energijos pasiskirstymo spektre maksimumas yra >1,4 μm. Antra, miridę supa optiškai storas silikatinių dulkių apvalkalas, kurio temperatūra <300 K. Jis sugeria visus žvaigždės skleidžiamus spindulius regimojoje spektro srityje ir juos perspinduliuoja infraraudonosiose bangose. Vėsiausios miridės stipriausiai

* Ši žvaigždžių rūšis pavadinta miridėmis pagal šviesiausios jų atstovės – Miros (Banginio Omikron) vardą.

spinduliuoja 5–10 μm bangose, taigi yra visiškai infraraudonieji šaltiniai. Jei normaliose miridėse optiškai plonuose apvalkaluose silikatai duoda 9,7 μm juostos ***emisiją***, tai infraraudonosiose miridėse optiškai storuose apvalkaluose silikatų juosta yra ***sugertinė***.

Dauguma infraraudonųjų miridžių yra OH, H_2O ir SiO radijo bangų ***mazerinio spinduliavimo šaltiniai***, todėl vadinami OH/IR šaltiniais. OH molekulė spinduliuoja keturias linijas ties 18 cm bangos ilgiu, H_2O molekulė – 1,35 cm liniją ir SiO molekulė – 3,5 ir 7,0 mm linijas. Mazerinis spinduliavimas kyla miridę supančiuose dujų debesyse. Jis atsiranda tada, kai dujų molekulių, esančių aukštesniame energijos lygmenyje, skaičius tampa didesnis negu molekulių, esančių žemesniame lygmenyje, skaičius. Tada per medžiagą praeinantis radijo bangų fotonas, kurio dažnis atitinka šuolio tarp dviejų minėtų lygmenų energiją, sukelia indukuotąjį spinduliavimą, t. y. priverčia molekulę išspinduliuoti į save panašų fotoną ir pereiti į žemesnį lygmenį. Taigi pro dujas praeinantys fotonai dauginasi. Mazeriniai fotonai visada sklinda ta pačia kryptimi ir yra tos pačios fazės kaip ir indukuojantys. Molekules į aukštesnį lygmenį sužadina infraraudonieji miridės spinduliai.

Anglingosios miridės, kurių paviršiuje anglies atomų skaičius yra didesnis už deguonies atomų skaičių, yra apsuptos dulkių apvalkalo, kuris irgi gali būti optiškai plonas arba storas. Jį sudaro silicio karbido (SiC) dulkelės. Šios dulkelės turi emisijos juostą ties 11,2 μm, kuri yra siauresnė ir kiek kitokios formos negu silikatų juosta ties 9,7 μm. Optiškai storuose apvalkaluose ši juosta yra sugertyje. Nė viena anglinga miridė nėra mazerinių radijo bangų šaltinis, nes jų aplinkoje yra labai maža turinčių deguonies molekulių (OH, H_2O ar SiO).

5.29.3. Sproginėjančios žvaigždės

Kaip sako pats pavadinimas, šių žvaigždžių šviesio kitimo priežastis yra sprogimo pobūdžio. Šviesio sužibimai įvyksta staigiai, tarp sprogimų (erupcijų) dažnai yra nevienodi laiko tarpai. Sprogimų priežastys gali būti įvairios – tiek vidinės, tiek paviršinės. Sproginėjančių žvaigždžių pagrindinės rūšys išvardytos **5.3** lentelėje.

II ir Ib rūšies supernovų sprogimo priežastis apžvelgėme aprašydami masyvių žvaigždžių raidą. Tai didelės masės ($\geq 8\,M_{\odot}$) žvaigždės, kurių geležinės šerdys, pasibaigus termobranduolinėms reakcijoms, iš pradžių kolapsuoja, o po to sprogsta. Po sprogimo didelė žvaigždės masės dalis išsisklaido 5000 km/s greičiu: susidaro neutroninė žvaigždė (pulsaras) arba juodoji bedugnė, apsupta pleriono, t. y. pilnavidurio sferoido formą turinčio ūko (pavyzdžiui, Krabo ūkas).

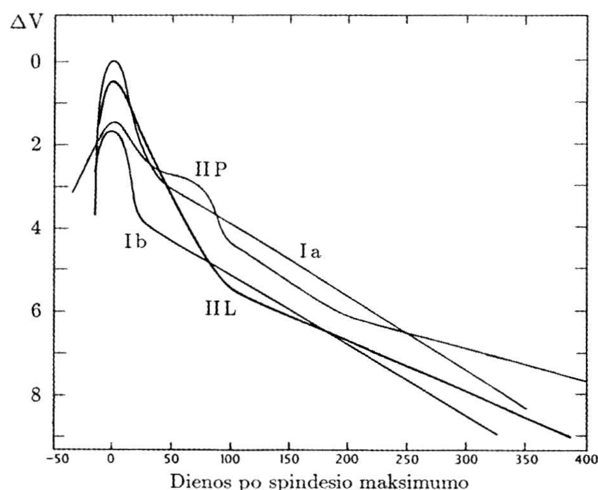
Ia rūšies supernovų prigimtis visai kitokia. Tai glaudi dvinarė žvaigždžių sistema, susidedanti iš baltosios nykštukės ir raudonosios milžinės. Iš milžinės atmosferos į baltąją nykštukę palaipsniui siurbiama medžiaga, kol bal-

5.3 lentelė. Sproginėjančių kintamųjų žvaigždžių rūšys

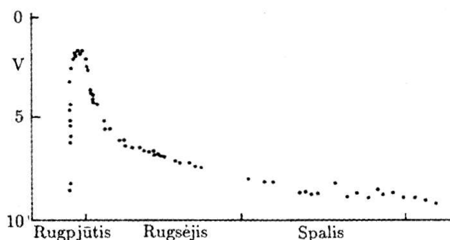
Rūšis	Būdinga atstovė	Tarpai tarp sprogimų	Žvaigždės pobūdis	ΔV amplitudė	Sprogimo energija J
Supernovos					
Ia rūšies	Tinklo ūko SN	–	Balt.n. + raud. milž.	> 20	10^{43}–10^{44}
II ir Ib rūšių	Krabo ūko SN	–	$\geq 8\ M_{\odot}$ masės žv-ė	> 20	10^{43}–10^{44}
Novos	N Cyg 1975	10^4–10^5m.	Balt.n. + raud. milž.	9–19	10^{37}–10^{39}
Kartotinės novos	T CrB	10–80 m.	Taip pat	7–9	10^{36}
Dvynių U žvaigždės	U Gem	10–1000 d.	Balt. n.+ raud. n.	2–6	10^{31}–10^{32}
Simbiotinės žvaigždės	Z And	–	O subn. + raud. milž.	3–4	~10^{31}
Cetidės	UV Cet	–	Raud. n.	3–4	10^{25}–10^{26}

Santrumpos: balt. n. – baltoji nykštukė, raud. milž. – raudonoji milžinė, raud. n. – raudonoji nykštukė, O subn. – O spektrinės klasės subnykštukė.

tosios nykštukės masė viršija Čandrasekaro ribą (1,44 $M_{\odot}$). Tada įvyksta baltosios nykštukės kolapsas, staiga užsidega branduolinės reakcijos tarp anglies ir deguonies branduolių, ir žvaigždė sprogsta. Sprogimo metu žvaigždė sužimba daugiau kaip 20 ryškių. Po maksimumo spindesys pamažu krinta, bet tai trunka kelerius metus. Po sprogimo beveik visa žvaigždės masė



5.54 pav. *Ia, Ib, IIL ir IIP rūšių supernovų būdingos spindesio kitimo kreivės. Ia rūšies supernovos spindesio maksimumas sunormuotas į V = 0. Kitų rūšių supernovų kreivių maksimumai atitinka jų absoliutinių ryškių ir Ia rūšies supernovų absoliutinių ryškių skirtumus. IIL supernovų spindesys kinta tiesiškai (L reiškia angl. linear – tiesiškas), IIP supernovų spindesio kreivė turi gūbrį (P reiškia angl. plateau – plynaukštė)*



5.55 pav. *Būdinga novos spindesio kitimo kreivė sužibimo metu ir po jo. 1975 m. Gulbės žvaigždyno nova V1500 Cyg*

išsisklaido 10 000 km/s greičiu: susidaro burbulo pavidalo pluoštinis ūkas (pavyzdžiui, Tinklo ūkas Gulbėje). Sprogimo metu maždaug pusė buvusios baltosios nykštukės masės virsta geležies gūbrio cheminių elementų branduoliais, tarp kurių gausiausias yra β^+ radioaktyvus nikelio izotopas ^{56}Ni. Jis virsta kobaltu ^{56}Co, o pastarasis – geležimi ^{56}Fe. Šių radioaktyviųjų virsmų metu išsiskirianti energija palaiko eksponentiškai silpstantį sprogusios žvaigždės spinduliavimą. Baltąją nykštukę prieš sprogimą sudaro vien tik anglis ir deguonis, todėl Ia rūšies supernovų spektruose visai nesimato vandenilio linijų. Be to, Ia rūšies supernovos sprogime beveik visa žvaigždės masė išblaškoma į erdvę, ir jos dažnai nelieka neutroninei žvaigždei (pulsarui) susidaryti. Supernovos rūšis gali būti nustatyta pagal jos spindesio kitimo kreivės formą (**5.54** pav.).

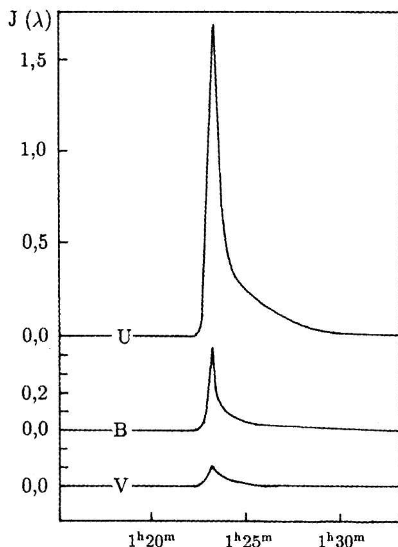
Novos (angl. *novae*) irgi yra glaudžios dvinarės žvaigždžių sistemos, kurių vienas narys baltoji nykštukė, o antras narys – raudonoji milžinė ar submilžinė. Sužibimo priežastis yra termobranduolinės vandenilio degimo reakcijos, vykstančios ant baltosios nykštukės paviršiaus susikaupusioje medžiagoje, kuri pamažu srūva iš raudonosios žvaigždės. Sužibimo metu nova nusimeta tik 10^{-3}–10^{-5} savo masės dalį, kuri išsisklaido erdvėje ~1000 km/s greičiu. Kartotinės novos skiriasi nuo kitų novų tuo, kad sprogimai daugiau ar mažiau periodiškai kartojasi. Tikriausiai kartojasi ir kitų novų sprogimai, bet tarpai tarp jų yra labai ilgi (šimtai ar tūkstančiai metų) ir nežinomi. Charakteringa novos spindesio kitimo kreivė sužibimo metu ir po jo parodyta **5.55** pav.

Novoms giminingos vadinamosios ***simbiotinės žvaigždės*** (angl. *symbiotic stars*), kurių žinomiausi pavyzdžiai yra Z And, CI Cyg, AG Dra ir kitos. Šios rūšies žvaigždės simbiotinėmis buvo pavadintos todėl, kad jų spektruose stebima tiek karštų, tiek vėsių žvaigždžių linijų simbiozė (sugyvenimas). Šios žvaigždės yra glaudžios dvinarės sistemos, sudarytos iš raudonos M klasės milžinės ir karštos subnykštukės. Abi žvaigždes supa iš raudonosios milžinės medžiagos susidaręs dujų apvalkalas. Spindesio sužibimai vyksta dėl to, kad šio apvalkalo medžiaga krinta į subnykštukės paviršių. Skirtingai nuo novų šiuo atveju išsilaisvina tik kinetinė kritimo energija, branduolinės reakcijos nevyksta.

Dvynių U rūšies sproginėjančios žvaigždės irgi yra glaudžios dvinarės sistemos, kurias sudaro baltoji ir raudonoji nykštukės. Baltąją nykštukę gaubia akrecinis plazmos diskas, sudarytas iš medžiagos, srūvančios iš raudonosios nykštukės atmosferos. Sužibimus, kurie kartojasi kas 10–1000 dienų, sukelia disko medžiagos kritimas ant baltosios nykštukės paviršiaus. Šio kriti-

mo metu taip pat nevyksta jokios branduolinės reakcijos, o kinetinė energija virsta šiluminiu spinduliavimu kaip ir simbiotinėse žvaigždėse.

Panašios į Dvynių U rūšies žvaigždes yra ***Heraklio AM*** rūšies žvaigždės arba ***poliarai***. Jos taip pat yra glaudžios baltosios ir raudonosios nykštukių poros, baltoji nykštukė taip pat siurbia raudonosios medžiagą. Tačiau skirtumas yra tas, kad baltosios nykštukės magnetinis laukas yra labai stiprus (1000–10 000 T). Dėl to užgrobiama medžiaga nesudaro disko, o ~4000 km/s greičiu krinta per magnetinių polių rajonus, iš kur nuolat sklinda stiprūs Rentgeno spinduliai. Poliaro šviesa regimojoje spektro srityje sklinda iš krintančios į baltąją nykštukę medžiagos ir yra stipriai poliarizuota. Ją skleidžia elektronai judėdami spirale apie magnetinio lauko jėgų linijas. Tai vadinamasis ciklotroninis spinduliavimas, kurio dažnis yra lygus elektrono apsisukimo aplink magnetines linijas dažniui:



5.56 pav. *Banginio UV rūšies žvaigždės (cetidės) spindesio žybsnys U, B ir V reakcijos juostose. Didžiausia žybsnio amplitudė visada būna ultravioletiniame spektro ruože*

$$\nu = \frac{eH}{m_e\, c}; \qquad (5.125)$$

čia H – magnetinio lauko stipris. Spinduliavimas vyksta ir harmonikose 2ν, 3ν ir t. t.

Išsamiau apie glaudžias dvinares žvaigždžių sistemas, jų narių sąveiką ir raidą bus rašoma **5.31** poskyryje.

Banginio UV (UV Ceti) rūšies žvaigždės arba ***cetidės*** yra veikiau žybsinčios negu sproginėjančios. Tai pavienės K ir M spektrinių klasių nykštukės, kurioms būdingas staigus pašviesėjimas – žybsnys (**5.56** pav.). Spindesys įsižiebia per 1–2 minutes keliais ryškiais, po to krinta 1–2 valandas. Žybsniai kartojasi nereguliariai, jų dažnumas įvairioms cetidėms yra skirtingas, daugiausia esti kelių valandų eilės. Cetidžių žybsniai yra gimininga Saulės žybsniams ir vyksta chromosferoje įvykus skirtingo poliškumo magnetinių linijų trumpajam susijungimui.

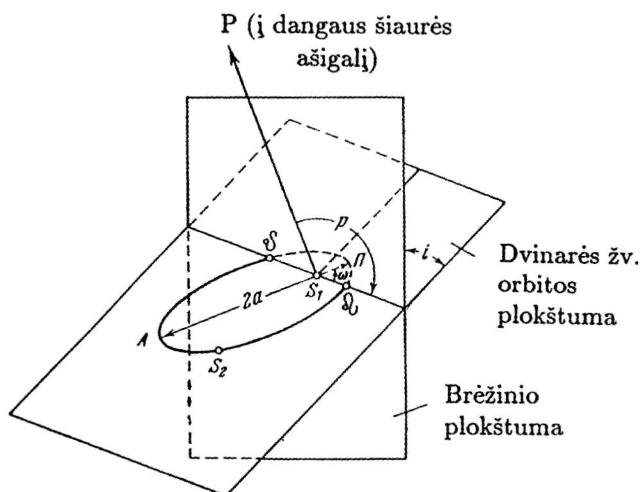
Dar viena fizinių kintamųjų žvaigždžių rūšis, giminingа sproginėjančioms žvaigždėms, yra orionidės, aprašytos **5.15** poskyryje. Jų netaisyklingą ryškio kitimą iš dalies sukelia chromosferiniai žybsniai, panašūs į tuos, kurie vyksta cetidžių paviršiuose.

5.30. DVINARĖS IR DAUGIANARĖS ŽVAIGŽDŽIŲ SISTEMOS

Saulės aplinkoje maždaug kas antra žvaigždė yra dvinarės sistemos narys. Trinarės sistemos sudaro apie 20% nuo dvinarių skaičiaus, o keturnarės – apie 15% nuo trinarių skaičiaus. Žinoma ir dar gausesnių daugianarių žvaigždžių (iki 6–7 narių). Reikia skirti fizines dvinares ir daugianares žvaigždes nuo optinių. Fizinėse dvinarėse ir daugianarėse visi nariai skrieja aplink bendrą masės centrą, o optinių dvinarių ir daugianarių nariai tarp savęs neturi jokio gravitacinio ryšio ir matomi greta tik dėl atsitiktinio krypčių sutapimo.

Fizinių daugianarių žvaigždžių nariai gali būti ne bet kokie, o tik tokie, kuriuos leidžia žvaigždžių raida. Taip yra todėl, kad sistemos žvaigždės yra susidariusios iš tarpžvaigždinio dujų ir dulkių gniužulo visos kartu, taigi turi vienodą amžių. Tad jų padėčių HR diagramoje skirtumai susidaro tik dėl skirtingų masių ir raidos greičio (jei žvaigždžių sistema nėra glaudi ir tarp narių nėra medžiagos pertekėjimo).

Pagal atradimo būdą dvinarė arba daugianarė žvaigždžių sistema gali būti vizualinė, spektrinė, užtemdomoji, astrometrinė. Vizualinės dvinarės sistemos nariai matomi atskirai, jų apskriejimo periodai būna nuo kelių iki kelių tūkstančių metų, jų žinoma apie 100 000. Spektrinės dvinarės žvaigždžių sistemos dvinariškumą rodo periodiškas radialinio greičio kitimas ir spektro linijų poslinkiai, jų periodai yra nuo kelių valandų iki kelių metų, jų žinoma apie 3000. Užtemdomosios dvinarės žvaigždžių sistemos dvinariškumą rodo jos spindesio kitimas, kai nariai vienas kitą užtemdo. Tokių žvaigždžių periodai



5.57 pav. *Dvinarės žvaigždžių sistemos santykinė orbita ir jos elementai. Paaiškinimai tekste*

panašūs į spektrinių, jų žinoma apie 5000. Astrometrinės dvinarės žvaigždžių sistemos aptinkamos pagal periodišką savojo judėjimo kitimą. Dalis dvinarių žvaigždžių sistemų atrandama interferometrijos, spekl-interferometrijos ir Mėnulio okultacijų metodais, taip pat daugiaspalvės fotometrijos metodu. Daug naujų vizualinių dvinarių žvaigždžių sistemų atrado orbitinė observatorija „Hipparcos".

Dvinarės sistemos masyvesnis narys vadinamas pirminiu, mažesnės masės – antriniu. Narių judėjimas vyksta pagal Keplerio dėsnius – abiejų narių orbitos yra elipsės aplink bendrą sistemos masės centrą. Abiejų elipsių ekscentricitetai lygūs. Tokį pat ekscentricitetą turi ir santykinė antrinio nario orbita aplink pirminį narį, jei pastarasis laikomas nejudančiu.

5.57 pav. parodyta santykinė dvinarės sistemos orbita ir tos orbitos elementai. S_1 yra masyvesnis pirminis narys, o S_2 – antrinis narys. Regimoji santykinė orbita yra tikrosios orbitos projekcija į dangaus sferą (arba brėžinio plokštumą). Santykinės orbitos didysis pusašis $a = a_1 + a_2$; čia a_1 ir a_2 – abiejų narių elipsių aplink bendrą masės centrą didieji pusašiai. Pirminis narys yra viename santykinės orbitos židinių. Antrinio nario santykinės orbitos taškas, artimiausias pirminiam nariui, vadinamas periastru Π, o priešingas orbitos taškas – apastru A.

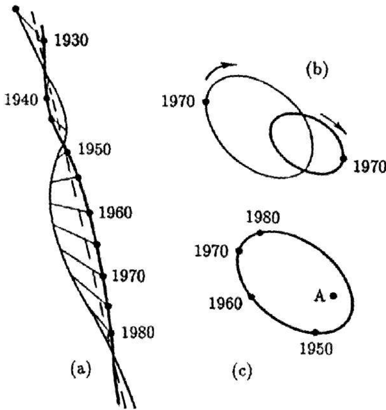
Santykinės orbitos formą ir antrinio nario padėtį nusako šie orbitos elementai: P – apskriejimo periodas, paprastai matuojamas metais, T – antrinio nario praskriejimo per periastrą momentas, e – orbitos ekscentricitetas, a – didysis orbitos pusašis, i – orbitos posvyris, t. y. kampas tarp tikrosios orbitos ir brėžinio plokštumų. Orbitos plokštumoje visi kampai atskaitomi nuo vieno iš jos mazgų. Mazgais vadinami taškai, kuriuose orbita kerta brėžinio plokštumą. Orbitos plokštumos kampas tarp mazgo ir periastro vadinamas periastro ilguma ω. Brėžinio plokštumoje mazgo padėtį nusako pozicinis kampas p, atskaitomas nuo krypties į dangaus ašigalį iki mazgų linijos.

Pagal narių tikrąjį tarpusavio atstumą dvinarės žvaigždžių sistemos skirstomos į tolimas ir glaudžias poras. Tolimos poros yra tokios, kai nuotolis tarp narių bent dešimt kartų didesnis negu pačių žvaigždžių skersmenys. Glaudžiosios dvinarės sistemos nariai yra arčiau vienas kito ir tam tikruose raidos etapuose gali vienas su kitu sąveikauti – keisti formą, iš vieno nario medžiaga gali srūti į kitą, vienas narys gali įkaitinti kito nario šoną.

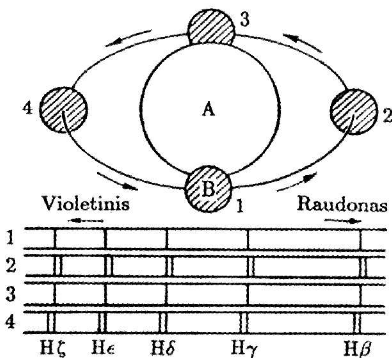
Trinarės žvaigždžių sistemos paprastai susideda iš glaudžios dvinarės sistemos ir tolimesnio trečiojo nario, sudarančio antrojo rango porą su pirmųjų dviejų narių masių centru. Keturnarės žvaigždžių sistemos dažniausiai susideda iš dviejų glaudžių porų, sudarančių antrojo rango porą. Dvynių β (Kastoras) yra šešianarė sistema, susidedanti iš trijų glaudžių porų: dvi glaudžios poros sudaro antrojo rango sistemą, o trečioji pora yra palyginti toli nuo dviejų pirmųjų ir sudaro su jomis trečiojo rango sistemą. Daugianarės sistemos,

kurių visų narių tarpusavio nuotoliai yra panašūs, esti nestabilios ir ilgainiui suyra, jos vadinamos Trapecijos sistemomis pagal charakteringą jų atstovę – Oriono ūke esančią trapecijos formos keturnarę žvaigždę.

5.30.1. Vizualinės dvinarės sistemos



5.58 pav. *Sirijaus ir jo palydovės – baltosios nykštukės dvinarė sistema: a`– Sirijaus A (stora linija) ir Sirijaus B (plona linija) savasis judėjimas dangaus sferoje; skaičiai žymi metus, b – regimosios abiejų narių orbitos aplink masės centrą, c – santykinė regimoji Sirijaus B orbita aplink Sirijų A*



5.59 pav. *Spektrinės dvinarės žvaigždės antrinio nario spektro linijų poslinkiai pirminio nario linijų atžvilgiu dėl Doplerio reiškinio. Pirminis narys laikomas nejudančiu*

Stebint vizualines dvinares žvaigždžių sistemas, galima išmatuoti narių tarpusavio kampinį atstumą ρ'' ir centrų linijos pozicinį kampą θ, t. y. kampą tarp krypties į šiaurinį dangaus ašigalį ir abi žvaigždes jungiančios linijos. Vykdant ilgamečius stebėjimus, galima aptikti vieno nario skriejimą aplink kitą, išmatuoti abiejų žvaigždžių tikslias koordinates įvairiose orbitos vietose ir nustatyti apskriejimo periodą P, praskriejimo pro periastrą momentą T ir mazgų linijos pozicinį kampą p. Norint nustatyti kitus orbitos elementus, reikia žinoti jos posvyrio kampą i. Posvyrio nustatymas remiasi tuo, kad orbitos projekcijoje į brėžinio plokštumą pirminis narys būna ne elipsės židinyje, o kiek pasislinkęs į šalį. Jo padėtis vienareikšmiškai priklauso nuo orbitos posvyrio kampo i ir periastro ilgumos ω. Žinant orbitos posvyrį, lengva apskaičiuoti tikrąjį ekscentricitetą e bei didįjį orbitos pusašį a kampiniais vienetais. Jei žinomas žvaigždės paralaksas arba nuotolis, galima rasti orbitos pusašio ilgį.

Pagal trečiąjį Keplerio dėsnį

$$M_1 + M_2 = \left(\frac{a''}{\pi''}\right)^3 P^{-2}, \qquad (5.126)$$

kur narių masių suma yra Saulės masėmis, P – metais ir a'' – didysis orbitos pusašis kampinėmis sekundėmis, π'' – metinis paralaksas. Kai kuriais atvejais pavyksta nustatyti abiejų narių santykinius nuotolius nuo masių centro, nes dvinarės sistemos nariai svyruoja į šalis nuo savojo judėji-

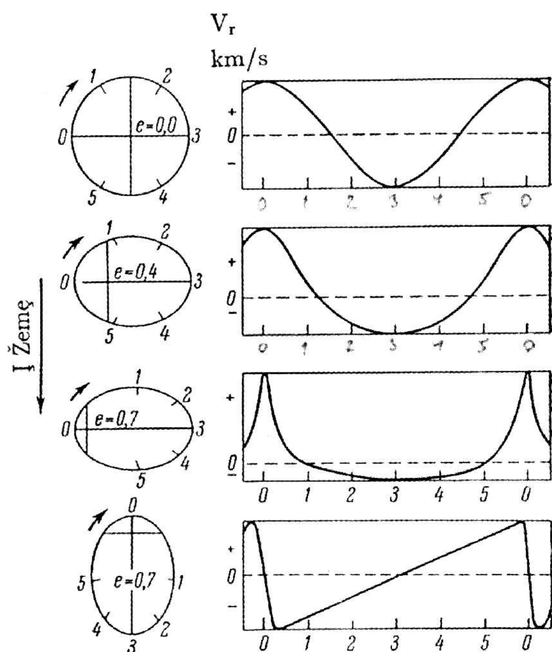
mo linijos (**5.58** pav.). Tuo remiantis, galima sudaryti antrąją lygtį, į kurią įeina masių santykis:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2''}{a_1''} \,. \qquad (5.127)$$

Iš (**5.126**) ir (**5.127**) lygčių galima nustatyti vizualinės dvinarių žvaigždžių sistemos narių mases. Tai tiesioginis informacijos šaltinis apie žvaigždžių mases.

5.30.2. Spektrinės dvinarės sistemos

Jei dvinarės žvaigždžių sistemos nariai dangaus sferoje yra arčiau negu 0,1–0,2″, jie atskirai nematomi, ir apie žvaigždės dvinariškumą galima spręsti tik iš spektro analizės. Kadangi nariai skrieja aplink bendrą masės centrą, jie tai artėja į mus, tai tolsta nuo mūsų. Dėl radialinio greičio kitimo slankioja jų spektrinės linijos. Spektrinių linijų poslinkius iliustruoja schema, parodyta **5.59** pav. Keturioms nario B padėtims nario A atžvilgiu apačioje parodyti keturi spektrai. Šiuose spektruose nario B linijos nepasislinkusios, kai jis juda statmenai regėjimo spinduliui (padėtys *1* ir *3*). Maksimalus linijų poslinkis į raudonąją ar violetinę pusę būna tada, kai žvaigždė tolsta arba artėja (padėtys *2* ir *4*).



5.60 pav. *Keturių spektrinių dvinarių žvaigždžių sistemų, turinčių skirtingus ekscentricitetus ir įvairias orbitų orientacijas, radialinių greičių kreivės*

Radialinių greičių kreivės forma priklauso nuo orbitos ekscentriciteto ir didžiosios ašies projekcijos į dangaus sferą orientacijos stebėtojo atžvilgiu (**5.60** pav.). Taigi pagal radialinių greičių kreives galima nustatyti periodą, didžiojo pusašio projekcijos orientaciją, ekscentricitetą. Tačiau lieka nežinomas orbitos posvyris i. Stebimasis radialinis greitis yra tikrojo orbitinio greičio projekcija į regėjimo spindulį. Keičiantis orbitos posvyriui, radialinis greitis kinta proporcingai $\sin i$. Kai $i = 90°$, radialinio greičio kitimai didžiausi, kai $i \to 0°$, radialinio greičio kitimai ir linijų poslinkiai dingsta. Tuo atveju apie žvaigždės dvinariškumą galima spręsti tik iš to, kad stebimos dviejų žvaigždžių spektrinės linijos. Tačiau taip bus tik tada, kai abiejų narių šviesiai panašūs ($\Delta m < 1{,}5$), o spektrinės klasės gerokai skiriasi. Jei spektrinės klasės artimos, juose matyti abiejų narių sutampančios linijos. Jei antrinis narys gerokai silpnesnis už pirminį, jo linijos nustelbiamos šviesesnio nario ištisinio spektro.

Kaip ir vizualinių dvinarių sistemų atveju, spektrinėms dvinarėms sistemoms galima pritaikyti (**5.126**) formulę ir gauti masių sumą. Tačiau spektrinių sistemų atveju nėra jokios informacijos apie orbitos posvyrį, tad orbitos didysis pusašis lieka nežinomas – žinoma tik jo projekcija į dangaus sferą a'. Norint gauti tikrąjį pusašį, reikia a' dalyti iš $\sin i$. Tada tikroji masių suma

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{P^2 \sin^3 i}. \qquad (\mathbf{5.128})$$

Kai žinomos abiejų narių radialinių greičių kreivės, tinka lygtis

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{K_2}{K_1}, \qquad (\mathbf{5.129})$$

kur K_1 ir K_2 yra pirminio ir antrinio nario radialinių greičių kreivių pusamplitudės. Kombinuojant (**5.128**) ir (**5.129**) lygtis, galima gauti $M_1 \sin^3 i$ ir $M_2 \sin^3 i$. Tarę, kad $i = 90°$, gausime minimalias abiejų narių mases.

Kai žinoma tik pirminio nario radialinio greičio kreivė, galima nustatyti masių funkciją:

$$f = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2}, \qquad (\mathbf{5.130})$$

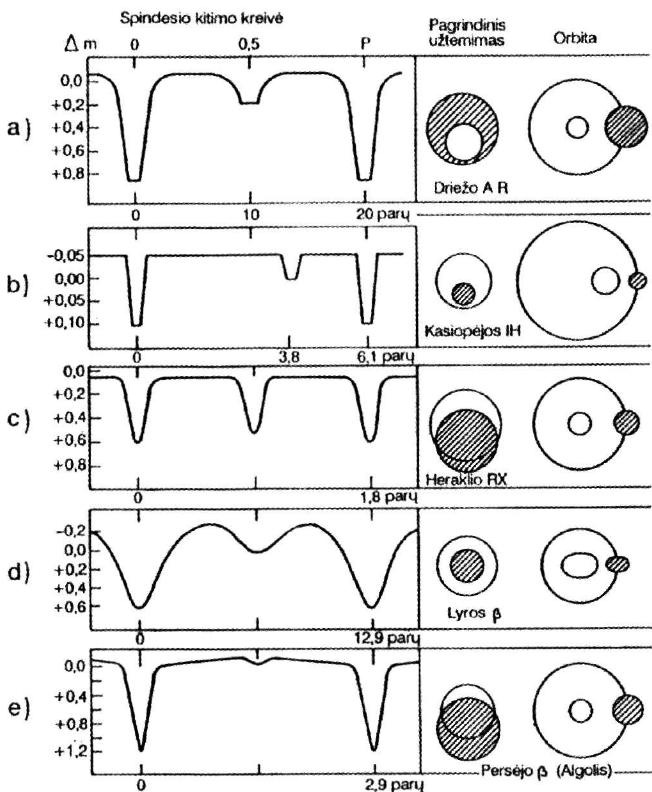
kuri apskaičiuojama iš periodo, ekscentriciteto ir parametro K_1.

5.30.3. Užtemdomosios dvinarės sistemos

Kai dvinarės žvaigždžių sistemos orbita yra beveik lygiagreti regėjimo spinduliui ($i = 90°$), vienas narys periodiškai užstoja kitą narį ir bendras abiejų žvaigždžių spindesys susilpnėja. Kadangi užtemdomosios žvaigždės kartu yra ir spektroskopinės dvinarės sistemos, todėl žinomos jų radialinių greičių krei-

vės. Fotometriniai tokios žvaigždžių poros stebėjimai per periodą duoda daug papildomos informacijos. Pirmiausia, tokioms žvaigždėms žinomas orbitos posvyris, ir todėl išnyksta sin *i* neapibrėžtumas, būdingas spektrinėms dvinarėms. Be to, atsiranda galimybė įvertinti abiejų narių dydį, formą, šviesį, kampinį nuotolį. Užtemdomosioms sistemoms taip pat galima nustatyti orbitų periodus, ekscentricitetus, didžiosios ašies orientaciją. Kombinuojant spindesio ir radialinio greičio kitimo kreives, galima gauti narių mases. Iš šviesio ir spindulio galima išskaičiuoti efektinę temperatūrą.

Užtemdomosios žvaigždžių sistemos kartais būna ***glaudžios dvinarės*** (angl. *close binaries*), kurių narių tarpusavio nuotolis yra tos pat eilės, kaip ir pačių žvaigždžių dydžiai. Dėl tarpusavio traukos tokios žvaigždės deformuojasi ir įgyja kiaušinio formą. Jų spindesio kitimo kreivės visai neturi horizontalių atkarpų – kreivės maksimumai ir minimumai apvalūs (**5.61** pav., *d*). Tokias kreives turi Lyros β ir Grįžulo Ratų W rūšies dvinarės sistemos. Šios rūšies glaudžių porų spindesio kreivėse abu minimumai beveik vienodo gylio, nes abu nariai yra panašaus dydžio. Kitokią sąveiką rodo Persėjo β arba Algolio



5.61 pav. *Įvairių rūšių užtemdomųjų žvaigždžių sistemų spindesio kreivės ir jų paaiškinimas*

rūšies žvaigždės: jų spindesys prieš ir po mažojo užtemimo yra didesnis negu prieš ir po didžiojo užtemimo (**5.61** pav., *e*). Tai yra atspindžio reiškinys. Kada Algolio maža ir šviesi karštoji žvaigždė (spektrinė klasė B8 V) yra raudonosios submilžinės (spektrinė klasė G5 IV) priekyje, karštosios žvaigždės nematomojo pusrutulio šviesa krinta ant raudonosios žvaigždės ir apšviečia jos atmosferą. Taip atsiranda papildoma šviesa aplink mažąjį spindesio kreivės minimumą.

Turėkime omenyje, kad glaudžių dvinarių, turinčių elipsoidinę formą, spindesys kinta net tais atvejais, kai nevyksta nei visiški, nei daliniai užtemimai. Spindesio kitimą sukelia pačių narių regimojo paviršiaus ploto kitimas dėl pailgos jų formos. Tokios žvaigždės vadinamos ***elipsoidinėmis*** kintamosiomis žvaigždėmis.

5.31. GLAUDŽIŲ DVINARIŲ ŽVAIGŽDŽIŲ SISTEMŲ RAIDA

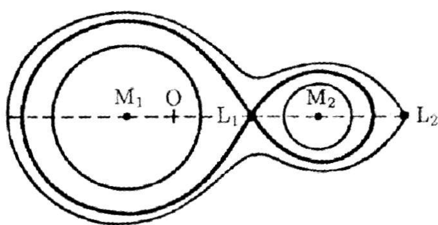
Tolimųjų dvinarių sistemų nariai evoliucionuoja kiekvienas sau kaip ir pavienės žvaigždės, ir jų raida praktiškai nepriklauso nuo to, ar jie įeina į dvinarę sistemą, ar ne. Tačiau kai dvinarės sistemos narių tarpusavio nuotolis yra panašaus dydžio kaip ir pačios žvaigždės, abu nariai ima sąveikauti ne vien per gravitacijos lauką. Tokioje sistemoje atsiranda potvyninės jėgos, kurios deformuoja žvaigždes, ir jos išsitempia išilgai jas jungiančios tiesės. Iš vienos žvaigždės į kitą ima tekėti dujos. Norint suprasti šios tėkmės mechanizmą, reikia susipažinti su Rošo ertmės sąvoka.

Iš gravitacijos lauko teorinių apskaičiavimų daroma išvada, kad aplink kiekvieną glaudžios dvinarės sistemos narį yra vienodo gravitacijos lauko potencialo paviršius, vadinamas ***Rošo paviršiumi***, už kurio atsidūrusios medžiagos dalelės apleidžia žvaigždę. Šio paviršiaus dydį ir formą sąlygoja antrojo nario gravitacija ir išcentrinė jėga dėl sistemos narių skriejimo aplink masės centrą.

Rošo ertmės matmenys nusako dinamiškai pastovių dvinarės sistemos narių dydžio viršutinę ribą. Kai medžiagos dalelės yra ant tokio paviršiaus, užtenka labai mažo greičio, nukreipto į išorę, ir tokia dalelė ištrūksta iš šios žvaigždės traukos sferos. Daleles, esančias Rošo paviršiaus apribotoje erdvėje (***Rošo ertmėje***), valdo tik vieno nario gravitacijos laukas. Aplink masyvesnį sistemos narį Rošo ertmė yra didesnė. Abiejų narių Rošo paviršiai panašūs į kriaušes, suglaustas kotais. Rošo ertmių pjūvio plokštuma, einanti per abiejų narių centrus, yra aštuoniukės formos (**5.62** pav.). Abiejų aštuoniukės pusių centre yra po žvaigždę, o Rošo ertmių lietimosi taškas sutampa su vidiniu Lagranžo tašku L_1. Jei viena iš sistemos žvaigždžių tampa didesnė negu jos Rošo ertmė, šios žvaigždės išorinių sluoksnių medžiaga pradeda tekėti per Lagranžo tašką į antrąją žvaigždę. Dėl to abiejų žvaigždžių evoliucija smarkiai pakinta. Tos žvaigž-

dės, kurios masė didėja, evoliucija greitėja, o tos, kurios mažėja – evoliucija lėtėja ir net grįžta atgal.

Įsivaizduokime glaudžią dvinarę žvaigždžių sistemą, kurios nariai yra pagrindinės sekos B7 ir G2 spektrinių klasių žvaigždės su masėmis 3 ir 1 $M_{\odot}$. Didesnės masės B7 klasės žvaigždė evoliucionuos daug greičiau ir po kurio laiko pavirs raudonąja milžine, kuri bus didesnė negu jos Rošo paviršius, o G2 klasės žvaigždė per tą laiką pasikeis labai mažai. Milžinės medžiaga per Lagranžo tašką ims sruventi į mažesnės masės žvaigždę, kurios masė didės, ir po kurio laiko ji gali tapti net masyvesnė už raudonąją milžinę. Dėl masės sumažėjimo raudonoji milžinė virs submilžine, o dėl padidėjusios masės buvusi pagrindinės sekos G klasės žvaigždė pakils pagrindine seka aukštyn ir taps A ar B spektrinės klasės žvaigžde. Po to, kai ji virs raudonąja milžine, medžiagos srautas gali pakeisti kryptį. Priklausomai nuo pradinių narių masių ir nuo jų tarpusavio nuotolio galima daugybė įvairių jų raidos variantų.



5.62 pav. *Glaudžios dvinarės žvaigždžių sistemos su narių masių santykiu M_1/M_2 = 4,65 Rošo ertmių pjūvis. L_1 ir L_2 – vidinis ir išorinis Lagranžo taškai, O – sistemos masės centras*

Masyvesnis greičiau kintantis dvinarės sistemos narys gali užpildyti Rošo ertmę įvairiose savo raidos stadijose. Kuo trumpesnis dvinarės sistemos periodas, t. y. kuo arčiau yra abu nariai, tuo greičiau tai įvyksta. Kai periodas yra dienos eilės, masyvioji žvaigždė užpildo Rošo ertmę dar nenutolus nuo pagrindinės sekos, kol žvaigždė lėtai plečiasi senkant vandenilio atsargoms centre. Jei periodas yra kelių dešimčių dienų eilės, Rošo ertmė užpildoma masyvesnei žvaigždei kylant į raudonąsias milžines. Jei periodas yra daugiau kaip 3 mėnesiai, tai įvyksta tik asimptotinėje sekoje.

Plazma, sruvenanti per Lagranžo tašką, turi didelį sukimosi momentą. Dėl to ji negali kristi ant antrinio nario, kol tas momentas nebus prarastas. Todėl ši medžiaga sudaro greitai besisukantį diską aplink antrinį narį ir tik iš jo krinta ant paviršiaus praradusi sukimosi momentą dėl vidinės trinties. Šis diskas vadinamas ***akreciniu***, nes iš jo vyksta medžiagos akrecija (užgrobimas, angl. *accretion disk*). Kitas akrecijos mechanizmas yra per žvaigždžių vėją, kuris laisvai krinta į antrinį narį. Jei šis narys turi stiprų magnetinį lauką, vėjo plazma nukreipiama magnetinių polių link ir krinta į paviršių tik ties jais. Medžiagos perdavimas iš vienos žvaigždės į kitą per žvaigždžių vėją yra daug lėtesnis.

Poskyryje **5.29.3** buvo minėta, kad Ia rūšies supernovos, novos, Dvynių U rūšies žvaigždės ir rentgeniniai barsteriai yra glaudžių dvinarių sistemų nariai, sudaryti iš kompaktiško didelio tankio nario – baltosios nykštukės arba neutroninės žvaigždės ir raudonos žvaigždės (milžinės ar nykštukės), užpil-

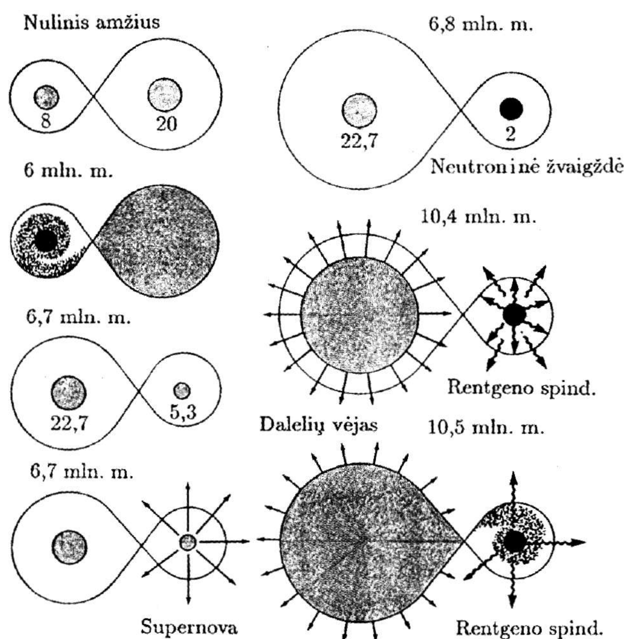
dančios Rošo ertmę. Medžiagos kritimas ant kompaktiško nario sukelia sprogimus jo paviršiuje, pasireiškiančius kaip žybsniai optiniame arba Rentgeno spektro ruožuose.

Rentgeno spindulius skleidžiančių dvinarių sistemų vienas narys visada yra neutroninė žvaigždė arba juodoji bedugnė, susidariusios po supernovos sprogimo. Pagal antrojo nario masę ir pagal Rentgeno spindulių pobūdį jos skirstomos į 4 grupes.

5.31.1. Pastoviai Rentgeno spindulius skleidžiančios masyvios žvaigždės

Jų orbitiniai periodai yra nuo 1,5 iki 10 dienų. Matomasis narys yra O arba B klasės supermilžinė su ~20 $M_\odot$ mase, užpildanti Rošo ertmę. Būdingos šios rūšies atstovės yra Cyg X1, Cen X3, SMC X1 sistemos. Pirma, iš normalios žvaigždės sklinda stiprus dalelių vėjas, ir, antra, medžiaga srūva per Lagranžo tašką ir sudaro akrecinį diską aplink neutroninę žvaigždę, kurio vidinė dalis yra įkaitusi iki 10–100 mln. K ir skleidžia Rentgeno spindulius.

Tokios dvinarės sistemos susidaro taip. Pradžioje yra glaudi pora, susidedanti iš 20 ir 8 $M_\odot$ žvaigždžių, kurias vadinsime 1-ąja ir 2-ąja (**5.63** pav.). Po



5.63 pav. *Glaudžios dvinarės sistemos su masyviais nariais raidos schema. Skaičiai metais žymi laiką, praėjusį po to, kai abi žvaigždės pasiekė nulinio amžiaus pagrindinę seką*

6 mln. metų 1-oji žvaigždė tampa milžine ir užpildo savo Rošo ertmę – prasideda medžiagos srautas į 2-ąją žvaigždę, kuri greit tampa masyvesnė už 1-ąją. Tačiau 1-oje žvaigždėje jau būna susidariusi geležinė šerdis, kuri kolapsuoja, ir žvaigždė sprogsta kaip II rūšies supernova. Jos vietoje lieka neutroninė žvaigždė su 2 $M_{\odot}$ mase, o 2-oji žvaigždė, įgavusi papildomą masę, ima greitai evoliucionuoti ir tampa milžine. 2-oji žvaigždė užpildo savo Rošo ertmę ir iš jos neutroninės žvaigždės kryptimi pradeda sruventi plazma sudarydama aplink ją akrecinį diską. Disko medžiaga dėl vidinės trinties netenka sukimosi momento ir ima spirale kristi į neutroninę žvaigždę. Šis kritimas vyksta milžinišku greičiu, didesniu nei 1/3 šviesos greičio. Krintanti medžiaga susiduria su diske skriejančia medžiaga, ir dėl jų tarpusavio trinties vidinių disko dalių plazma įkaista iki 10–100 mln. K. Todėl vidinė disko dalis ima skleisti galingus Rentgeno spindulius (10^{29}–10^{31} W).

Dauguma masyvių žvaigždžių su pastoviu Rentgeno spinduliavimu kartu yra ir rentgeniniai pulsarai, kurių pulsavimo periodai yra nuo sekundės dalių iki 10 minučių. Šis pulsavimas vyksta todėl, kad neutroninės žvaigždės magnetinis polius tai pasirodo, tai pasislepia jai besisukant apie ašį. Ties magnetiniais poliais yra karštos ~1 km skersmens dėmės, nes ten į neutroninės žvaigždės paviršių atsitrenkia plazma, krintanti išilgai magnetinio lauko jėgų linijų. Šios dėmės ir spinduliuoja pulsuojančio stiprumo Rentgeno spindulius, kurie persidengia su disko vidinės dalies pastoviai skleidžiamais spinduliais.

5.31.2. Nereguliariai Rentgeno spindulius skleidžiančios masyvios žvaigždės

Šių žvaigždžių sistemų orbitiniai periodai nuo keliolikos iki kelių šimtų dienų. Būdinga tokia dvinarė sistema yra X Per. Matomasis narys yra labai greit besisukanti aplink ašį emisinė B0e–B3e žvaigždė su 10–20 $M_{\odot}$ mase, priklausanti V, IV ar III šviesio klasei. Žvaigždė yra giliai Rošo ertmėje, bet ją supa dujų diskas, atsiskyręs dėl greito sukimosi apie ašį. Nematomasis narys yra neutroninė žvaigždė. Šių žvaigždžių Rentgeno spinduliavimas yra labai kintamas – nuo silpno pastovaus srauto iki stiprių blyksnių, kurie trunka savaites ir mėnesius. Silpną Rentgeno spindulių srautą sukelia visą laiką sklindantis iš Be žvaigždės dalelių vėjas. Rentgeno spinduliavimas sustiprėja, kai į neutroninę žvaigždę supantį diską patenka didesni dujų kiekiai, atsiskyrę nuo Be žvaigždės pusiaujo ir ją supančio disko.

Šios rūšies dvinarės sistemos susidaro pagal tokią schemą. Pradžioje yra glaudi dvinarė sistema, susidedanti iš maždaug 16 ir 10 $M_{\odot}$ žvaigždžių ir turinti 5 dienų orbitinį periodą. Po 6,9 mln. metų 1-oji žvaigždė užpildo savo Rošo ertmę, ir medžiaga pradeda sruventi į 2-ąją žvaigždę, kurios masė

padidėja iki 22 $M_\odot$, o 1-osios masė sumažėja iki 4 $M_\odot$. Po to 1-oji žvaigždė sprogsta kaip II rūšies supernova, ir susidaro 1,4 $M_\odot$ neutroninė žvaigždė ir 20 $M_\odot$ emisinė B žvaigždė.

5.31.3. Vidutinės ir mažos masės rentgeninės žvaigždės

Šios rūšies dvinarių sistemų orbitiniai periodai yra nuo vienos iki kelių dešimčių dienų. Jų regimieji nariai daugiausia yra A–F–G spektrinių klasių pagrindinės sekos žvaigždės, užpildžiusios savo Rošo ertmę. Jų masės būna 1–2 $M_\odot$, o neutroninės žvaigždės masė – apie 1 $M_\odot$. Būdingos šios rūšies sistemos yra Sco X1 (stipriausias visame danguje Rentgeno spindulių šaltinis), Her X1, Cyg X2 ir kiti. Dauguma šių žvaigždžių skleidžia stiprius Rentgeno spindulius nuolat, jie susidaro vidinėje karščiausioje akrecinio disko dalyje. Kai kurios šios rūšies rentgeninės žvaigždės kartu yra ir rentgeniniai pulsarai – Rentgeno spindulių impulsai pasirodo tuo momentu, kai neutroninė žvaigždė atsuka į mus vieną iš savo magnetinių polių. Rentgeno spindulius skleidžia labai įkaitusios (iki šimtų milijonų kelvinų) dėmės ties magnetiniais poliais, į kuriuos krinta užgrobta normaliosios žvaigždės medžiaga išilgai stipraus magnetinio lauko linijų. Tokių pulsarų ašinio sukimosi periodas labai sutrumpėja dėl papildomo judesio kiekio momento, kurį atneša užgrobiama kaimyninės žvaigždės medžiaga. Taip atsiranda ***milisekundiniai pulsarai*** (angl. *millisecond pulsars*). Žinomas milisekundinis pulsaras, kurio periodas lygus 0,00156 s, o tai atitinka 640 aps/s. Kartais neutroninė žvaigždė pamažu susiurbia visą normaliosios žvaigždės medžiagą, ir tada vietoje dviejų žvaigždžių sistemos atsiranda pavienis milisekundinis pulsaras.

Dalis mažos masės rentgeninių dvinarių sistemų yra vadinamieji ***bursteriai*** (angl. *bursters*). Jų Rentgeno spindulių srautas maždaug kas valandą staiga sužiba. Žybsnis trunka apie 10 sekundžių, po to žvaigždė vėl grįžta į prieš tai buvusį spinduliavimo lygį. Tokie Rentgeno spindulių žybsniai vyksta tada, kai neutroninė žvaigždė turi palyginti silpną magnetinį lauką ir medžiagos akrecija vyksta ne per magnetinius polius, bet visame paviršiuje. Kai neutroninės žvaigždės paviršiuje prisirenka pakankamai daug iš akrecinio disko nukritusios medžiagos, įvyksta termobranduolinis sprogimas, skleidžiantis Rentgeno, ultravioletinius ir regimuosius spindulius. Šio sprogimo metu vandenilis ir helis virsta sudėtingesniais elementais, iki pat geležies.

Kai kurios retai pasitaikančios mažos masės žvaigždžių sistemos yra ***rentgeninės novos*** (angl. *X-ray novae*). Jų elgesys labai primena normaliąsias novas – žvaigždė sužimba per 2–3 dienas, po to jos spindesys eksponentiškai mažėja kelis mėnesius. Rentgeninių novų sužibimo mechanizmas panašus į

barsterių, tik šiuo atveju į neutroninės žvaigždės paviršių iš karto krinta didelis akrecinio disko medžiagos kiekis, lydimas staigaus termobranduolinio sprogimo ir Rentgeno spindulių žybsnio.

5.31.4. Glaudžios dvinarės sistemos su juodąja bedugne

Dalis glaudžių dvinarių sistemų vietoje neutroninės žvaigždės gali turėti juodąją bedugnę. Norint tuo įsitikinti, reikia nustatyti nematomojo sistemos nario masę. Jei ji pasirodys besanti >3 $M_{\odot}$, tai juodosios bedugnės buvimas bus įrodytas. Kitas neišvengiamas glaudžios dvinarės žvaigždžių sistemos su juodąja bedugne požymis yra Rentgeno spinduliavimas. Kaip ir neutroninių žvaigždžių atveju, Rentgeno spindulius skleidžia vidinė akrecinio disko dalis, įkaitusi iki 10 mln. K. Juodoji bedugnė niekada negali būti rentgeninis pulsaras, barsteris ar nova, nes ji neturi nei kieto paviršiaus, nei magnetinio lauko.

Kai dvinarės žvaigždžių sistemos turi tik vieną matomą narį, abiejų narių masių sumą būtų galima nustatyti tik žinant orbitos posvyrį, pavyzdžiui, vykstant užtemimams. Po to, įvertinus matomojo nario masę pagal jo šviesį, galima būtų nustatyti apytikslę nematomojo nario masę. Deja, paaiškėjo, kad visos užtemdomosios rentgeninės dvinarės sistemos turi neutronines žvaigždes, kurių masės <2 $M_{\odot}$.

Taigi juodųjų bedugnių reikia ieškoti tarp neužtemdomų rentgeninių dvinarių sistemų bandant įvertinti orbitos posvyrį kitais būdais. Rastos kelios tokios dvinarės sistemos, kurių nematomasis narys tikriausiai turi juodosios bedugnės masę. Tarp tokių dvinarių sistemų patikimiausia kandidatė į juodąsias bedugnes yra Cyg X1, kurios nematomojo nario masė yra apie 6–7 $M_{\odot}$. Kiti Rentgeno šaltiniai, įtariami turint juodąsias bedugnes, yra LMC X3 Didžiajame Magelano Debesyje ir labai įdomus objektas SS 433 Erelio žvaigždyne. Rasti pavienes juodąsias bedugnes beveik neįmanoma.

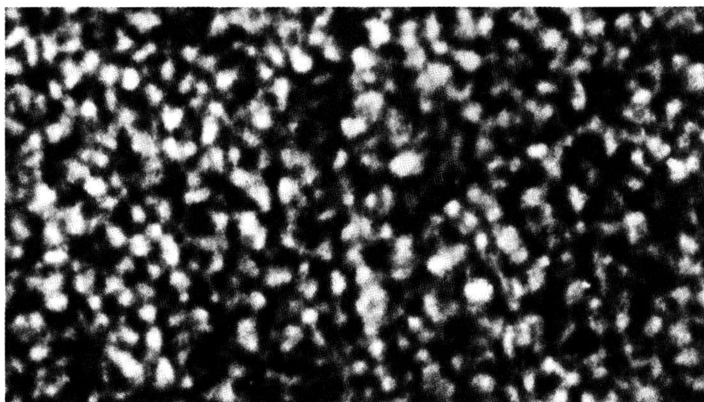
Žinoma apie 20 glaudžių žvaigždžių sistemų, vadinamų ***mikrokvazarais*** (angl. *microquasars*). Šių sistemų vienas narys yra normali didelės masės žvaigždė, o nematomasis narys – neutroninė žvaigždė arba juodoji bedugnė. Iš normaliosios žvaigždės srūva medžiagos srautas, sudarantis aplink nematomąjį objektą akrecijos diską, skleidžiantį Rentgeno ir gama spindulius. Iš šio disko statmenai orbitos plokštumai į priešingas puses trykšta čiurkšlės, kuriose medžiaga lekia artimu šviesai greičiu ir iš kurių sklinda sinchrotroninės radijo bangos. Dėl reiškinio panašumo su radijo galaktikomis ir kvazarais (išsamiau žr. **8.4.2.3** skirsnelį) tokie objektai pavadinti mikrokvazarais. Mikrokvazarai skiriasi nuo tikrųjų kvazarų savo dydžiu (jie yra maždaug milijoną kartų mažesni) ir akrecinio disko prigimtimi.

5.32. SAULĖS IR KITŲ ŽVAIGŽDŽIŲ SLUOKSNIAI VIRŠ FOTOSFEROS

Prieš apžvelgdami išorinius Saulės sluoksnius, grįžkime prie jos blizgančio paviršiaus – fotosferos, apie kurią jau rašėme **5.28** poskyryje. Be jau minėto fotosferos patamsėjimo einant į disko kraštus, Saulės nuotraukose matyti dar vienas fotosferos reiškinys – ***granuliacija*** (angl. *granulation*), arba grūdėtumas (**5.64** pav.), kuri yra išorinių Saulės sluoksnių konvekcijos apraiška. Granulės yra ne kas kita, kaip karštų dujų burbulai, kylantys iš gelmių aukštyn maždaug 400 m/s greičiu. Granulių temperatūra yra 200 K didesnė negu jas supančių tamsesnių sričių, kur vėsesnės dujos grimzta gilyn. Būdingas granulių dydis yra apie 1″, t. y. 700 km. Granulė išsilaiko apie 5–8 min. Vienoms granulėms išnykus, atsiranda naujos. Vienu metu Saulės fotosferoje būna maždaug 3 mln. granulių.

Fotosferoje dujų temperatūra krinta einant į išorę. Tam tikrame lygyje virš fotosferos, kur dujų tankis sumažėja iki $2{,}8.10^{-8}$ g/cm^3, o kinetinė dujų temperatūra iki 4500 K, įvyksta temperatūros eigos inversija – ten prasideda ***chromosfera*** (gr. *chroma* – spalva). Tolstant nuo Saulės centro, temperatūra ima didėti: iš pradžių lėtai, vėliau staigiai. Manoma, kad tokį temperatūros didėjimą chromosferoje sukelia garsinės ir magnetohidrodinaminės smūginės bangos, sukeliamos dujų konvekcijos srovių sąveikos su Saulės magnetiniu lauku. Skiriami du chromosferos sluoksniai – žemutinis iki 2000 km virš fotosferos ir iki 7000 K temperatūros ir viršutinis iki 4000 km virš fotosferos ir 40–50 tūkst. K temperatūros.

Chromosfera turi emisinį linijų spektrą, ypač gerai matomą visiškų Saulės užtemimų metu, kai Mėnulis uždengia akinančiai blizgančią fotosferą. Tuo metu aplink Mėnulio kraštą sužimba oranžinės spalvos žiedelis, kuriam

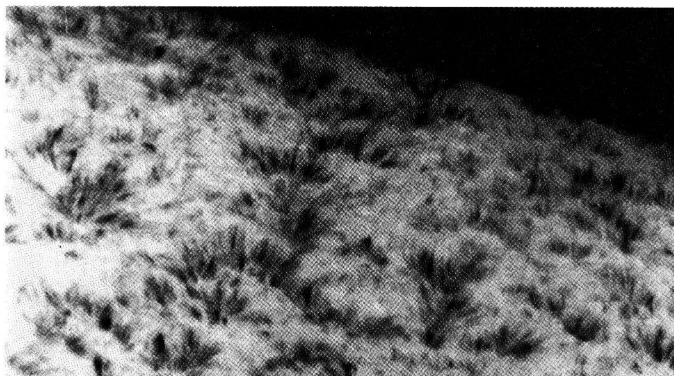


5.64 pav. *Saulės fotosferos granuliacija*

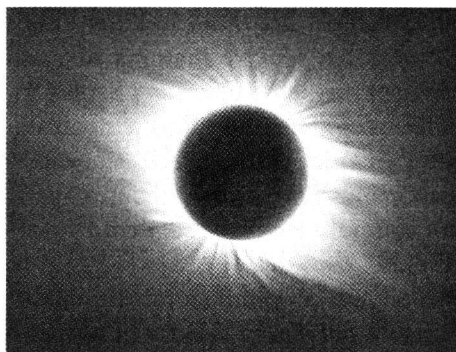
spalvą suteikia stipri vandenilio Balmerio serijos Hα linija ir kitos linijos žalioje ir geltonoje spektro srityje. Chromosferos spektre matoma tūkstančiai įvairių elementų linijų: chromosferos spektras labai panašus į Saulės fotosferos spektrą, tik visos linijos yra emisinės. Vandenilio linijų ir neutralių metalų emisijos linijos silpnėja, pereinant į viršutinį chromosferos sluoksnį – ten vandenilis ir dauguma metalų jonizuojami. Ten susidaro neutralaus ir jonizuoto helio, taip pat kelis kartus jonizuotų kitų lengvųjų elementų – anglies, azoto, deguonies, silicio emisijos linijos.

Chromosferos emisijos linijos yra labai silpnos palyginti su fotosferos ištisiniu spektru. Tačiau jei fotografuosime Saulę per siaurą šviesos filtrą, išskiriantį tik emisinę vandenilio ar jonizuoto kalcio liniją, tai gausime chromosferos nuotrauką, nes fotosferos spektre šios linijos yra sugertyje, t. y. šiose linijose fotosfera švyti silpnai. Todėl chromosferai tyrinėti daugiausia naudojami šviesos filtrai, išskiriantys Hα liniją arba jonizuoto kalcio H ir K linijas. Šiose linijose chromosferos emisija Saulės spektre matoma kaip emisijos komponentas, esantis gilios sugerties linijos dugne. Chromosferos emisijos linijos gerai matomos Saulės spektro ultravioletiniame ruože (<210 nm), kur fotosferos skleidžiamas ištisinis spektras yra labai silpnas. Ten yra daugybė chromosferos emisijos linijų, priklausančių vandenilio Laimano serijai, He II, C I–IV, N V, O I, VI, Si I–IV jonams.

Saulės nuotraukos Hα spinduliuose rodo gana margą paviršių, primenantį fotosferos granuliaciją. Tačiau ***chromosferos granulės*** yra daug didesnės, jų matmenys siekia 30 000 km. Šviesesnes granules supa tamsesnės pailgos ***spikulės*** (lot. *spiculum* – smaigalys), kurios ypač gerai matomos artėjant prie Saulės disko pakraščio ir primena žolės kupstus (**5.65** pav.). Visiško Saulės užtemimo metu spikulės matomos kaip šviesių beveik statmenų paviršiui brūkšnelių šepetys, išlindęs iš švytinčios chromosferos. Iš tikrųjų tai yra 1000 km



5.65 pav. *Saulės chromosferos spikulės ties disko pakraščiu, primenančios krūmus ar žolės kupstus*



5.66 pav. *Saulės vainikas, nufotografuotas visiško užtemimo metu*

storio plazmos liežuviai, kylantys iš fotosferos 20 km/s greičiu ir pasiekiantys 10 000 km aukštį. Spikulės gyvuoja vos kelias minutes. Vienu laiku visame Saulės paviršiuje jų turi būti apie 300 000.

4000 km aukštyje virš Saulės fotosferos chromosfera palaipsniui pereina į ***vainiką***, kurio sidabriška šviesa visiškų užtemimų metu supa visą Saulę ir nusitęsia kartais net per kelis Saulės spindulius (**5.66** pav.). Toliau vainikas pereina į ***Saulės vėją*** (angl. *Solar wind*) ir ***Zodiako šviesą*** (angl. *Zodiac light*). Saulės vainiko išvaizda palaipsniui kinta, bet ne taip greitai, kaip chromosferos granulių ir chromosferos spikulių. Vainiko išvaizda priklauso nuo Saulės aktyvumo fazės. Didžiausio Saulės aktyvumo metu vainikas yra beveik sferinės formos, mažiausio aktyvumo metu – netaisyklingos su kyšuliais formos. Didžiausi vainiko kyšuliai susidaro vadinamose ***vainiko skylėse*** (angl. *coronal holes*), kuriose yra retesnė plazma, žemesnė temperatūra ir silpnesnis magnetinis laukas. Vainiko dujų tankis ties apatine jo riba yra $\sim 10^8$ dalelių/cm^3. Kinetinės temperatūros inversija, t. y. jos didėjimas, tolstant nuo Saulės centro, tęsiasi ir vainike – maždaug 7000 km aukštyje virš fotosferos ji pasiekia 1 mln. K, o aukščiau – net 2 mln. K. Šios temperatūros charakterizuoja elektronų judėjimo greičius, o atomai juda daug lėčiau. Elektronų greitinimo mechanizmas Saulės vainike nėra visiškai išaiškintas. Greičiausiai tai rodo elektronų sąveiką su elektriniais ir magnetiniais laukais.

Didelio greičio elektronai, susidurdami su atomais, juos stipriai jonizuoja (smūginė jonizacija). Pavyzdžiui, aptinkamos Fe X–XIV, Si VI –XII, Mg XII, Ca XII–XV, Ni XIII–XVI emisijos linijos. Ypač daug vainiko skleidžiamų emisijos linijų matoma Saulės tolimajame ultravioletiniame ir Rentgeno spektre ($\lambda < 100$ nm). Be linijų, Saulės vainikas dar skleidžia ir ištisinį spektrą, kuris yra išsklaidyti fotosferos spinduliai. Žemutiniame vainike šią sklaidą sukelia laisvieji elektronai, o aukštutiniame vainike – dulkelės. Vainikas taip pat skleidžia ištisinį Rentgeno spektrą, kurio maksimumas 1 mln. K temperatūros plazmai yra ties 3 nm.

Ultravioletinėje, optinėje, infraraudonojoje spektro srityse ir iš dalies radijo bangose chromosfera ir Saulės vainikas yra optiškai ploni, taigi ten susidarę fotonai nesugeriami ir iš karto palieka chromosferą ir vainiką. Tačiau chromosfera yra neskaidri radijo bangoms su $\lambda > 10$ cm, o vainikas neskaidrus bangoms su $\lambda > 1$ m. Dėl to mus pasiekia milimetrinės ir centimetrinės

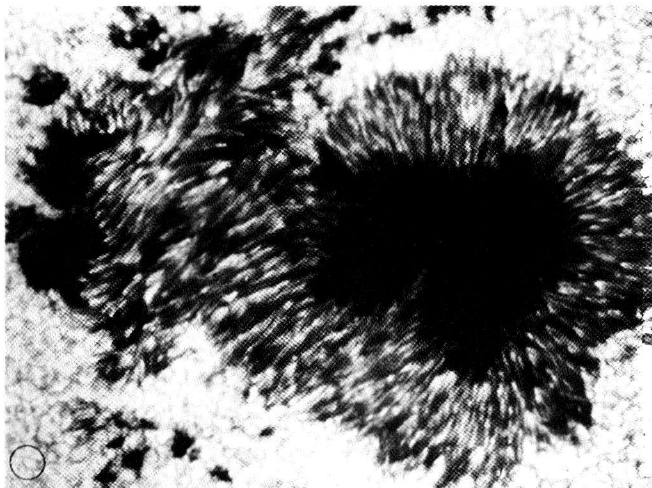
bangos iš visų Saulės atmosferos sluoksnių, decimetrinės bangos – iš chromosferos ir vainiko, o metrinės ir ilgesnės bangos – tik iš vainiko. Ramios Saulės skleidžiamos radijo bangos yra daugiausia šiluminės prigimties.

Iš vainiko sklinda Saulės vėjas – elektringųjų dalelių (protonų, elektronų, helionų) plazmos srautas. Del vėjo Saulė netenka maždaug 10^{-14} savo masės per metus. Prie Žemės orbitos Saulės vėjo greitis lygus 400–2000 km/s. Vėjo dalelių sąveika su Žemės magnetiniu lauku ir atmosfera sukelia polines pašvaistes ir magnetines audras.

Iki šiol apžvelgėme vienos iš žvaigždžių – Saulės išorinius sluoksnius. Tačiau neabejotina, kad chromosferas ir vainikus turi dauguma, o gal ir visos žvaigždės. Tai įrodo žvaigždžių spektruose matomos kalcio H ir K bei magnio h ir k dubletų sugerties linijų dugnuose matomi emisijos komponentai. Kai kuriose G, K ir M spektrinių klasių žvaigždėse, ypač nykštukėse, šios emisijos yra tokios stiprios, kad užpildo visą sugerties liniją ir iškyla virš ištisinio spektro. Ultravioletiniuose spektruose, kur vėsių žvaigždžių ištisinis spektras yra silpnas, matomos gausios chromosferinės emisijos linijos, tokios pat kaip Saulės spektre. Pagaliau daug žvaigždžių stipriai spinduliuoja Rentgeno srityje, o tai yra neabejotinas aukštos temperatūros vainiko buvimo įrodymas.

5.33. SAULĖS AKTYVUMAS

Be ankščiau aprašytųjų Saulės fotosferoje, chromosferoje ir vainike nuolat stebimų reiškinių, dar yra reiškiniai, susiję su Saulės aktyvumo kitimu. Tai Saulės dėmės, fakelai, protuberantai, flokulai, žybsniai ir kt. Visų šių reiškinių pasirodymo dažnumas cikliškai kinta maždaug 11,2 m. periodu.



5.67 pav. *Saulės dėmės. Ratukas kairiajame apatiniame kampe žymi Žemės dydį.*

Saulės dėmę sudaro tamsus ovalas – vadinamasis šešėlis ir jį supantis šviesesnis pusšešėlis (**5.67** pav.). Mažų dėmių, vadinamų poromis, skersmenys būna 1″ arba 700 km. Didelės dėmės būna 10–20″, t. y. 7000–15 000 km. Didžiausios dėmės kartais pasiekia 100 000 km skersmenis, t. y. būna bent 10 kartų didesnės už Žemę. Poros egzistuoja tik kelias paras, vidutinės dėmės 10–20 parų, o didžiausios – net iki 100 parų, taigi ilgiau nei Saulė tris kartus apsisuka apie ašį. Dėmės atrodo tamsios dėl kontrasto su jas supančia fotosfera, nes jų temperatūra yra 1500 K žemesnė, o skaistis – 4 kartus mažesnis.

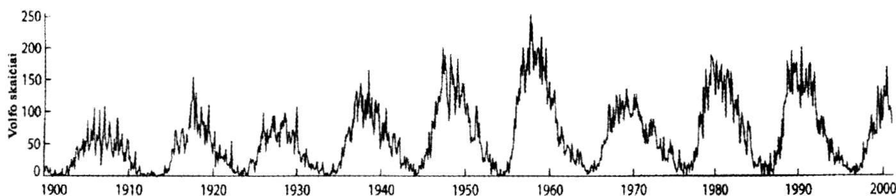
Kai Saulė mažiausiai aktyvi, dėmių joje labai maža ir jos matomos abiejuose pusrutuliuose ties 30° platuma. Laikui bėgant, jos randasi vis arčiau pusiaujo ir didžiausio aktyvumo metu daugiausia matomos ±5° platumos zonoje. Kai dėmėtumas ties pusiauju pasiekia maksimumą, vidutinėse platumose jau ima rodytis naujo aktyvumo ciklo dėmės.

Dėmės daugiausia susidaro poromis ir grupėmis, kuriose kartais būna dešimtys įvairaus dydžio dėmių. Aktyvumo lygį apibūdina vadinamasis ***Volfo skaičius***

$$W = k\,(d + 10g), \qquad (5.131)$$

čia d yra bendras dėmių skaičius, g – grupių skaičius, k – koeficientas, priklausantis nuo stebėjimo metodo ir teleskopo dydžio. Esant didžiausiam aktyvumui vidutinis metinis Volfo skaičius svyruoja tarp 45 (1802 m.) ir 190 (1957 m.). Paskutinysis aktyvumo maksimumas buvo 2000 m. viduryje. Tačiau būna periodų, kai Saulės aktyvumas labai sumažėja. Pavyzdžiui, tarp 1645 ir 1715 m. Saulėje visai nesimatė dėmių. Volfo skaičiaus kitimas XX amžiuje parodytas **5.68** paveiksle.

Saulės dėmėtumo reiškinys susijęs su jos magnetiniu lauku. Ramios Saulės fotosferos paviršiuje magnetinio lauko indukcija yra apie 10^{-4} T, tačiau kas 11 metų laukas keičia kryptį – šiaurės polius susikeičia su pietų poliumi, ir atvirkščiai. Tai atsitinka praėjus 1–2 metams po to, kai Saulės dėmių skaičius pasiekia maksimumą. Ramios Saulės magnetinio lauko jėgų linijos turėtų būti po paviršiumi ir eiti nuo vieno poliaus į kitą. Tačiau taip būtų tik tuo atveju, jei Saulė suktųsi apie ašį kaip kietas kūnas. Iš tikrųjų Saulės fotosfera sukasi nevienodu kampiniu greičiu – ties pusiauju apsisukimo periodas yra 25 d., o ties 40° platuma 27–28 d.

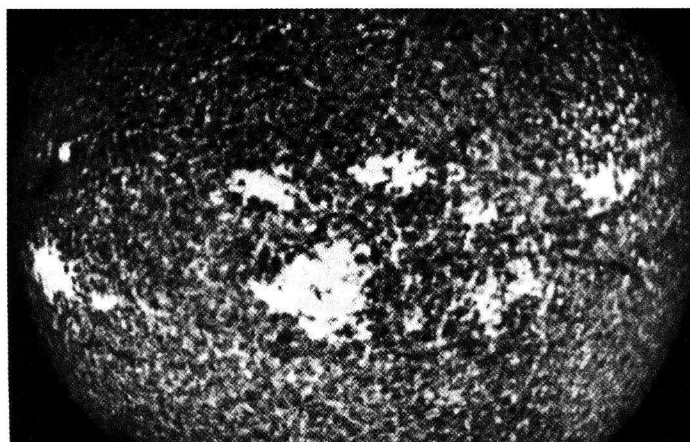


5.68 pav. *Saulės aktyvumo, išreikšto Volfo skaičiais, kitimas nuo 1900 iki 2000 m.*

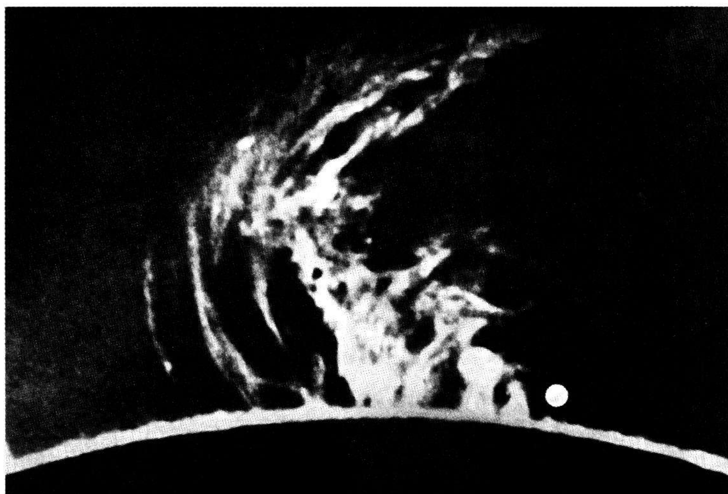
Dėl nevienodo sukimosi kampinio greičio magnetinio lauko jėgų linijos po truputį nukrypsta nuo Saulės meridiano krypties ir po daug apsisukimų susivynioja aplink ją. Po kelių metų lauko linijos tampa žiedais, lygiagrečiais Saulės pusiaujui. Pirmiausiai tai įvyksta aukštose Saulės platumose, vėliau – ties pusiauju. Magnetinio lauko jėgų linijos, sąveikaudamos su dujų masių judėjimu konvekcinėje zonoje, lyg virvės susisuka į pluoštus, deformuojasi, o jų išlinkimai kartais iškyla į paviršių sudarydami porą dėmių. Ten, kur linijų pluoštas išlenda į paviršių, susidaro vieno poliškumo dėmė, o ten, kur jis vėl įlenda gilyn – kito poliškumo dėmė. Magnetinio srauto tankis dėmės centre siekia 0,2–0,3 T, o lauko linijos yra statmenos paviršiui. Dėmės temperatūra yra žemesnė už fotosferos dėl to, kad magnetinis laukas pristabdo konvekcinį dujų judėjimą ir sumažina energijos išnešimą iš gelmių.

Kitas Saulės fotosferos aktyvumo reiškinys, lydintis dėmėtumą, yra ***fakelai*** (angl. *faculae*) ir juos atitinkantys chromosferos dariniai ***flokulai*** (angl. *flocculi, plages*) (**5.69** pav.). Baltos fakelų dėmės ir juostos supa tamsių dėmių grupes, juose plazma yra 200–300 K karštesnė negu aplinkinėje fotosferoje. Šie dariniai geriausiai matomi kaip balti lopinėliai ties Saulės disko pakraščiu. Fakelai yra vieni pastoviausių objektų Saulės fotosferoje – jie dažnai pasirodo dar prieš dėmes ir lieka kurį laiką po to, kai dėmės išnyksta. Fakelų atsiradimas susijęs su konvekcijos ir energijos išnešimo iš gelmių sustiprėjimu. Fiziškai fakelai yra aukštesnės fotosferos sritys, lyg kalnai, iškilę virš lygumos. Virš fakelų esantys chromosferos flokulai irgi turi didesnę temperatūrą negu aplinkinės sritys ir gerai matomi Hα ir Ca II K linijos emisijoje.

Visiško Saulės užtemimo metu disko pakraštyje matomi šviesūs dujų masių



5.69 pav. *Saulės chromosferos flokulai, nufotografuoti kalcio emisijos linijoje. Flokulai telkiasi virš aktyvių Saulės paviršiaus sričių aplink dėmes. Po flokulais yra fotosferos fakelų laukai*



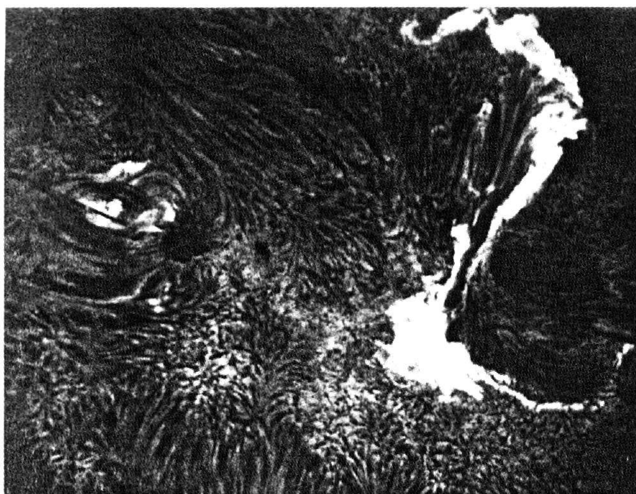
5.70 pav. *Saulės protuberantas. Baltas skrituliukas žymi Žemės dydį*

išsiveržimai į vainiką – ***protuberantai*** (lot. *protuberans* – išsikišęs, angl. *prominences*), iškylantys iki 100 000 km aukščio ir daugiau (**5.70** pav.). Yra ramieji ir erupciniai protuberantai. ***Ramieji protuberantai*** nesusiję su aktyviomis Saulės sritimis ir pasirodo visur, net ties Saulės ašigaliais. Jie panašūs į netaisyklingos formos liepsnos liežuvius, nusitęsusius pagal paviršių dešimtis ir šimtus tūkstančių kilometrų. Kartais jie šitaip išsilaiko kelis mėnesius pamažu keisdami savo dydį ir formą. Kai kada ramieji protuberantai pereina į aktyvią raidos stadiją, trunkančią kelias paras. Tuomet dujų masės greitai kyla aukštyn arba leidžiasi žemyn į chromosferą. Protuberanto judėjimo greitis paprastai didėja kylant aukštyn. Nėra abejonės, kad ramiųjų ir aktyviųjų protuberantų plazmą valdo magnetinis laukas.

Erupciniai protuberantai (lot. *eruptio* – išsiveržimas) pasirodo virš aktyviųjų Saulės sričių su dėmėmis ir fakelų laukais ir aiškiai turi staigaus išsiveržimo iš chromosferos pobūdį. Protuberanto judėjimo greitis kylant aukštyn mažėja, o tai rodo, kad jį valdo kinetinė energija ir gravitacijos laukas. Pasiekusi tam tikrą aukštį, protuberanto medžiaga ima kristi atgal į Saulę. Dalis medžiagos gali pasiekti kritinį greitį ir apleisti Saulę. Dažnai stebimi kilpos pavidalo erupciniai protuberantai, kuriuose medžiaga kyla ir leidžiasi išilgai magnetinių linijų pluošto. Erupcinių protuberantų kiekis ir aktyvumas yra labai susijęs su Saulės aktyvumo ciklu, o ramieji protuberantai tokio ryšio nerodo.

Protuberantuose plazma yra tankesnė ir vėsesnė negu juos supančiame vainike. Jos temperatūra yra 10 000–20 000 K. Nuotraukose Hα linijoje šviesios chromosferos fone protuberantai atrodo kaip tamsios siūlų pavidalo draiskanos.

Dar vienas reiškinys, susijęs su aktyviomis Saulės sritimis, yra ***chromosfe-***



5.71 pav. *Saulės chromosferos žybsnys ir jo aplinka*

riniai žybsniai (angl. *chromospheric flares*), pasirodantys fakelų laukuose aplink dėmes (**5.71** pav.). Žybsnio metu chromosferoje ir žemutiniuose vainiko sluoksniuose staigiai įsižiebia elektromagnetinių spindulių šaltinis, spinduliuojantis plačiame bangų ilgių ruože – nuo gama iki kilometrinių radijo bangų. Sužibimas įvyksta per kelias minutes, o po to energijos spinduliavimas eksponentiškai silpnėja kelias valandas. Manoma, kad žybsnį sukelia priešingo poliškumo magnetinių laukų trumpasis susijungimas ir anihiliacija magnetinių jėgų linijų arkos viršutinėje dalyje. Susijungimo vietoje plazma įkaista iki $\sim 10^7$ K ir ima spinduliuoti šiluminius Rentgeno spindulius. Kartu sklinda pagreitintų elektronų ir protonų srautas. Šių spindulių ir dalelių srautų sąveika su aplinkine plazma Saulės chromosferoje ir fotosferoje sukelia antrinius procesus – švytėjimą įvairiuose elektromagnetinių bangų ruožuose, dujų jonizaciją ir smūginę bangą. Dideliuose žybsniuose išsiskiria iki 10^{24}–10^{25} J energijos. Tokie dideli žybsniai yra reti, tačiau mažesni žybsniai kartojasi gana dažnai – iki 100 kartų per dieną.

Žybsnio metu susidarę Rentgeno ir ultravioletiniai fotonai po 8,3 minučių, o pagreitintų dalelių srautas (vadinamieji Saulės kosminiai spinduliai) po 10–30 minučių pasiekia Žemę ir jos atmosferos išoriniuose sluoksniuose staigiai padidina atomų jonizaciją. Dėl to sutrinka radijo ryšys trumposiomis bangomis. Po 1,5–2 dienų Žemę pasiekia protonų ir elektronų srautai (Saulės vėjo gūsis, išmestas smūginės bangos), kurie atmosferoje sukelia polines pašvaistes, sutrikdo Žemės magnetinį lauką ir sukelia magnetines audras.

5.34. ŽVAIGŽDŽIŲ AKTYVUMAS

Aktyvumo požymių rasta daugelio tipų žvaigždžių fotosferose, chromosferose ir vainikuose. Aktyvumui aptikti naudojami įvairūs būdai.

1. Saulės ir žvaigždžių dėmėtumas turi įtakos jų spindesiui. Saulės atveju dėmės padengia <0,2% jos paviršiaus, taigi šviesio pokytis yra <0,002 ryškio, o tokio pokyčio aptikti beveik neįmanoma. Tačiau yra žvaigždžių, kuriose dėmės padengia net iki 10–30% paviršiaus. Dėl to, žvaigždei sukantis apie ašį, galimi spindesio kitimai, siekiantys kelias dešimtąsias ryškio, o tai lengva aptikti. Pagal aktyvios žvaigždės spindesio kitimo kreivę galima sumodeliuoti dėmių ar jų grupių pasiskirstymą paviršiuje.

2. Dėl žvaigždžių aktyvumo kitimo aptinkami jų spindesio ir spalvos rodiklių kitimai mėnesių ir metų skalėje. Taip aptinkami aktyvumo kitimai, panašūs į Saulės 11 metų ciklą.

3. Yra žvaigždžių, kuriose aptinkami spindesio žybsniai, labai panašūs į Saulės chromosferinius žybsnius, tik daug galingesni (cetidės arba Banginio UV rūšies žvaigždės). Spektriniai žybsnių tyrimai patvirtina abiejų reiškinių gimininguma. Aptinkamos taip pat žybsnių skleidžiamos radijo bangos ir Rentgeno spinduliai.

4. Aktyvumą patvirtina kai kuriose žvaigždėse stebimas chromosferinių emisijos linijų arba jų emisinių komponentų (ypač Hα, Ca II H ir K ir Mg II h ir k) stiprio kitimas.

Aktyvumo požymiai aptinkami pagrindinės sekos F–G–K–M spektrinių klasių žvaigždėse, pavienėse F–G–K submilžinėse ir milžinėse, taip pat kai kurių tipų glaudžių dvinarių žvaigždžių sistemose. Nustatyta, kad pagrindinės sekos žvaigždžių atveju chromosferos linijų stipris mažėja ilgėjant žvaigždės amžiui ir mažėjant ašinio sukimosi greičiui.

Ypač aktyvias chromosferas turi jaunos žvaigždės, esančios dar pakeliui į pagrindinę seką – K ir M spektrinių klasių orionidės ir cetidės. Abiejų tipų žvaigždžių spektruose matoma daugybė stiprių chromosferinių linijų, o cetidės dar pasižymi stipriais chromosferiniais žybsniais. Yra cetidžių rūšis, vadinamosios Slibino BY rūšies žvaigždės, kurių spindesys valandų ar dienų ilgio periodais kinta iki 0,5 ryškio. Spindesio kitimą sukelia besisukančios žvaigždės paviršiuje esančios milžiniškos dėmės.

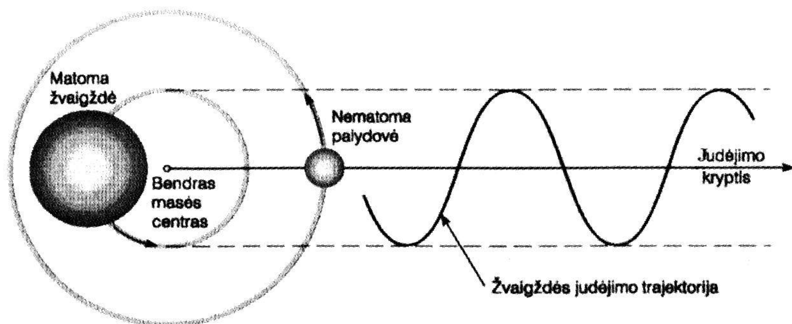
Kitos dėmėtų žvaigždžių grupės yra Berenikės Garbanų FK ir Skalikų RS rūšių žvaigždės. Berenikės Garbanų FK žvaigždės yra pavienės milžinės, labai greitai besisukančios apie ašį (iki 100 km/s pusiaujyje). Priminsime, kad normalios milžinės sukasi maždaug 10 kartų lėčiau. Skalikų RS žvaigždės yra glaudžios dvinarės, kurių karštesnis narys yra F arba G spektrinės klasės nykštukė ar submilžinė, o vėsesnis narys – K spektrinės klasės submilžinė.

5.35. ŽVAIGŽDŽIŲ PLANETOS

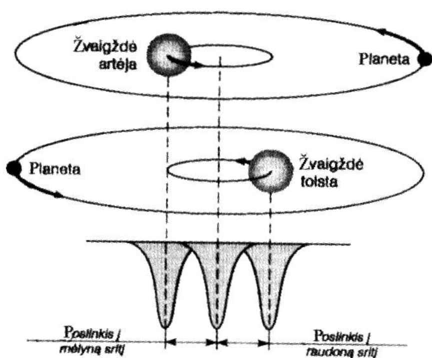
Ilgą laiką Saulės sistema buvo vienintelė žinoma planetų sistema Visatoje. Taip yra todėl, kad planetų dydžio kūnai per silpni, kad būtų matomi iš kelių ar keliasdešimt šviesmečių nuotolio. Be to, stebėjimui trukdo stipri centrinės žvaigždės šviesa. Tačiau buvo pagrįstai manoma, kad didžiulė dalis žvaigždžių gali turėti savas planetų sistemas. Buvo ir kai kurių netesioginių duomenų, leidžiančių įtarti egzistuojant planetas prie kai kurių artimiausių žvaigždžių. Pavyzdžiui, buvo aptikti kai kurių žvaigždžių (pvz., Barnardo žvaigždės) savojo judėjimo periodiniai svyravimai į šalis, kuriuos galėjo sukelti aplink jas skriejančios didelės planetos (**5.72** pav.). Aplink kai kurias žvaigždes aptikti meteoritų, dulkių ir dujų diskai, panašūs į proplanetinį diską, egzistavusį aplink Saulę susidarant planetų sistemai. Tokie diskai egzistuoja aplink kai kurias A spektrinės klasės žvaigždes (Vega, Fomalhautas, Tapytojo β ir kitos) bei jaunas orionides (Tauro ir Oriono žvaigždynuose). Hablo kosminiu teleskopu gautos tokių diskų nuotraukos.

Tačiau tiksliausi duomenys apie kitų žvaigždžių planetas gauti dideliu tikslumu stebint šių žvaigždžių radialinio greičio svyravimus. (**5.73** pav.). Pirmoji svetima planeta radialinių greičių metodu buvo atrasta 1995 m. Ji skrieja aplink Pegaso 51 žvaigždę ir savo gravitacija sukelia žvaigždės radialinio greičio ±60 m/s svyravimus. Šiuo metodu kas metai atrandama po kelias F–G spektrinių klasių pagrindinės sekos žvaigždes su aplink jas skriejančiomis planetomis. 2003 m. pradžioje jau buvo žinoma daugiau nei 100 planetų sistemų. Ties kai kuriomis žvaigždėmis aptiktos dvi, o gal ir trys planetos. Daugumos atrastų planetų orbitos yra artimos apskritimams.

Tiesa, radialinių greičių metodu atrandamos tik palyginti masyvios planetos, kurių trauka yra pakankamai didelė, kad sukeltų centrinės žvaigždės radialinio greičio svyravimus. Atrastųjų planetų masių žemutinė riba yra tarp 0,5 ir 12 Jupiterio masių. Tikslią planetos masę, kaip ir jos viršutinę ribą, nustatyti neįmanoma nežinant planetos orbitos posvyrio kampo. Be to,



5.72 pav. *Žvaigždei skriejant poroje su nematoma palydove, jos kelyje atsiranda vingiai*



5.73 pav. *Žvaigždei artėjant, jos spektro linijos dėl Doplerio reiškinio pasislenka į mėlynąją, tolstant – į raudonąją pusę*

dauguma atrastųjų planetų skrieja aplink savo žvaigždes arčiau negu Venera aplink Saulę. Tokios planetos vadinamos „karštaisiais jupiteriais“. Manoma, kad jos susidarė gerokai toliau nuo savo žvaigždės, bet per kelis milijardus metų priartėjo prie jos dėl stabdymo proplanetinės medžiagos diske.

Dar keli planetų masės kūnai atrasti aplink supernovų liekanas – pulsarus. Planetos atrastos pagal jų gravitacijos įtaką į radijo bangų pulsacijų dažnį. Šiuo metodu aptiktos gerokai mažesnės planetos – kai kurios jų tik 2–3 kartus masyvesnės už Žemę. Kol kas neaišku, kaip tokios planetos galėjo išlikti per supernovų sprogimus.

6
SKYRIUS

TARPŽVAIGŽDINĖ MEDŽIAGA

Algimantas Ažusienis

6.1. BENDROS ŽINIOS APIE TARPŽVAIGŽDINĘ MEDŽIAGĄ

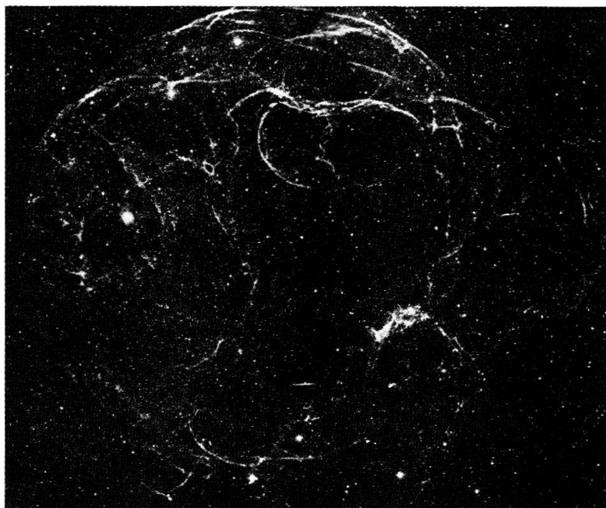
6.1.1. Tarpžvaigždinės medžiagos cheminė sudėtis, vieta Galaktikoje

Erdvė tarp žvaigždžių galaktikose nėra visiškai tuščia. Joje pasklidę ne tik ***neutrinai*** bei ***lauko formos materija*** (gravitaciniai ir magnetiniai laukai, elektromagnetinės ir gravitacinės bangos), bet ir ***tarpžvaigždinė medžiaga*** – atomų, jonų, elektronų, o tankesnėse vietose ir molekulių dujos. Kur yra molekulių, ten klajoja ir kietojo kūno gabalėliai – mikroskopinės 0,005–0,50 μm skersmens tarpžvaigždinės dulkelės. Jos sudaro apie 1% visos tarpžvaigždinės medžiagos masės. Tarpžvaigždinių dujų cheminė sudėtis maždaug tokia pat kaip ir daugelio pirmosios populiacijos žvaigždžių. Didesnio tankio tarpžvaigždinės medžiagos debesyse, kur yra daug dulkelių, dujoms aiškiai trūksta aliuminio, titano, kalcio, geležies, nikelio, magnio, silicio: jų yra dešimtis ar šimtus kartų mažiau negu Saulėje. Matyt, daug šių atomų yra patekę į dulkelių sudėtį.



6.1 pav. *Atspindžio ūkas aplink Sietyno žvaigždę Meropę*

Mūsų Galaktikoje tarpžvaigždinės medžiagos išliko palyginti labai

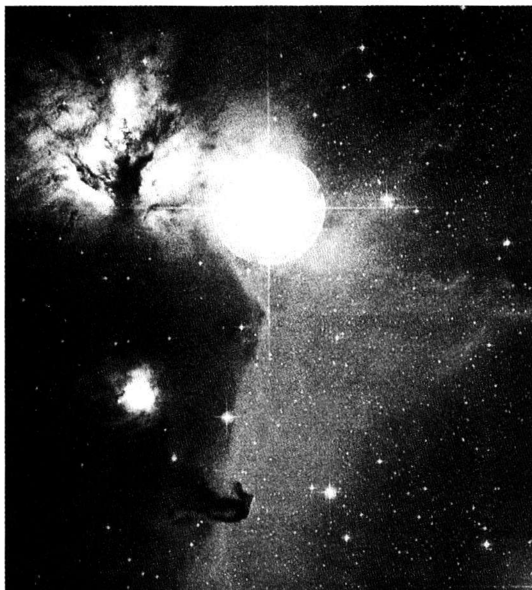


6.2 pav. *Šaino 147 ūkas Vežėjo žvaigždyne. Tai prieš keliolika ar keliasdešimt tūkstančių metų sprogusios supernovos likučių ūkas. Jo kampinis skersmuo 3°, nuotolis 500–1000 pc*

nedaug – tik apie 5% visos Galaktikos masės (jei Galaktikos masę vertiname be vadinamosios nematomosios medžiagos, apie kurią bus kalbama **7.12** poskyryje). Didžioji šios medžiagos dalis yra nusėdusi į pagrindinę Galaktikos plokštumą ir sudariusi čia įgaubtą 35 000 parsekų (pc) skersmens lęšį, kurio storis ties Galaktikos centru maždaug 150 pc, o pakraščiuose, kur silpnesnė žvaigždžių trauka pagrindinės plokštumos link – apie 10–15 kartų didesnis. Šio dujų lęšio pakraščiai net iki 500 pc nukrypę nuo pagrindinės Galaktikos plokštumos. Ta lęšio pakraščio dalis, kuri iš Saulės matoma pietinių Paukščių Tako žvaigždynų kryptimi, dangaus sferoje nuo pagrindinės plokštumos yra nukrypusi pietinio dangaus ašigalio link. Tai reiškia, kad šis dujų lęšio pakraštys nukrypęs Magelano Debesų link. (Magelano Debesys yra dvi labai artimos mažos galaktikos, mūsų Galaktikos palydovės.) Kitas dujų lęšio pakraštys, matomas šiaurinių Paukščių Tako žvaigždynų Gulbės ir Cefėjo link, nukrypęs į priešingą pusę – šiaurinio dangaus ašigalio link.

Lęšio viduje tarpžvaigždinė medžiaga yra labai nevienodos temperatūros ir tankio. Imant labai apytiksliai, tarpžvaigždinės medžiagos telkinius galima sugrupuoti į šias grupes: ***vainikinės dujos***, ***tarpdebesinės dujos***, arba kitaip sakant, ***difuzinių debesų aureolės***, ***difuziniai debesys*** (kadangi šiuose debesyse dauguma vandenilio atomų nėra nei jonizuoti, nei susijungę į molekules, jie dar vadinami ***H I debesimis***), ***molekuliniai debesys,*** didžiuliai difuzinių ir molekulinių debesų telkiniai, vadinami ***superdebesimis.***

Švytintys debesys arba jų dalys vadinami ***ūkais*** – vieni ***atspindžio ūkai*** (jei švyti debesyje esančios dulkelės, atspindėdamos ir išsklaidydamos jas apšvietusios žvaigždės šviesą), kiti ***emisiniai ūkai*** (jei labai karšta žvaigždė arba jų



6.3 pav. *Šviesūs ir tamsūs ūkai prie Oriono ζ, arba Alnitako. Ši antrojo ryškio O spektrinės klasės žvaigždė yra paveikslo viršutinės pusės centre. Jos labai išplitęs difrakcinis vaizdas (koncentriški beveik susilieję žiedai ir keturi ilgi šviesūs spinduliai) yra įsiterpęs tarp emisinių ūkų – IC 434, esančio į pietus (paveiksle žemiau) Alnitako, ir NGC 2024, esančio į rytus (paveiksle kairėje) Alnitako. Kitų, silpnesnių žvaigždučių panašūs difrakciniai vaizdai yra daug mažiau išplitę. Paveikslo kairįjį viršutinį kampą ir centrinės bei apatinės dalies kairiąją pusę dengia didžiulio tamsaus ūko pakraštys. Šio ūko didesnio tankio sritys, pasipriešinusios besiplečiančių emisinių ūkų spaudimui, tapo tamsios medžiagos iškyšuliais. Du didžiausieji gavo Italijos ir Arklio Galvos vardus. Tarp jų tamsaus ūko fone matosi nedidelis atspindžio ūkas, žymimas NGC 2023. Didžiausio tankio tamsaus ūko vietose formuojasi naujos žvaigždės. Minėtasis emisinis ūkas 2024 dėl skaisčiai raudonos spalvos pliūpsnių vadinamas Liepsnos ūku*

grupė pajėgia jonizuoti debesies vandenilį, o kartais ir helį, tuo būdu sukeldama dujų švytėjimą, kuris atsiranda dujoms rekombinuojant ir mažėjant jų sužadinimui). Dar tebešvytinti supernovų sprogimų ištaškyta žvaigždžių medžiaga vadinama ***supernovų likučių ūkais***. Nuo labai išsipūtusių žvaigždžių daug ramiau atitrūkę išoriniai sluoksniai sudaro ***planetiškuosius ūkus***.

Įvairioms danguje šviečiančioms dėmelėms ūkų vardas prigijo nuo XVIII a. pabaigos, juos taip pavadinus Anglijoje gyvenusiam vokiečių kilmės astronomui Viljamui Heršeliui (*F. W. Herschel*). Prancūzų astronomas Šarlis Mesjė (*Ch. Messier*) 1781 m. sudarė pirmąjį ūkų katalogą.

Visas kitų ir jo paties rastas šviečiančias dėmeles, kad jos netrukdytų ieškoti kometų, Š. Mesjė pažymėjo eilės numeriais, kuriais ir dabar dažnai pasinaudojame. Prieš tą numerį rašome katalogo autoriaus pirmąją raidę: Krabo ūkas žymimas M 1, Lagūnos – M 8, Omega – M 17, Trilypis – M 20, Didysis

Oriono ūkas – M 42 ir t. t. 1786–1802 m. V. Heršelis išleido tris katalogus, juose smulkiai aprašęs apie 2500 ūkų ir žvaigždžių spiečių (XX a. paaiškėjo, kad daugumą ūkų sudaro galaktikos). 1888 m. airių astronomas Johanas Drejeris (*J. L. Dreyer*) išleido daug išsamesnį „Naująjį bendrąjį ūkų ir žvaigždžių spiečių katalogą" (NGC). Jame Krabo ūkas žymimas NGC 1952, Lagūnos – NGC 6523, Omega – NGC 6618, Trilypis – NGC 6514, Oriono ūkas – NGC 1976, Rozetė – NGC 2237–8–9, Šiaurės Amerika – NGC 7000 ir t. t. 1895 m. ir 1908 m. J. Drejeris išleido katalogo papildymus – „Indeksų katalogus", žymimus IC I ir IC II. Iš viso į Drejerio katalogus įtraukta maždaug 13 000 objektų (ūkų, spiečių ir galaktikų).

6.1.2. Vainikinės dujos

Apie pusę viso dujų lęšio tūrio užima vadinamosios ***vainikinės dujos***. Tai labiausiai praretėjusi tarpžvaigždinės medžiagos dalis. Pavienės dujų dalelės – protonai, laisvieji elektronai, helio branduoliai, sunkesnių atomų jonai – čia yra toli viena nuo kitos. Kiekvienai tokiai dalelei tenka šimtai ar net daugiau kaip tūkstantį cm^3 tuščios erdvės.

Retose vainikinėse dujose smūgiai tarp dalelių įvyksta vidutiniškai tik kartą per šimtus ar tūkstančius metų, nors dalelių blaškymosi greičiai ten yra didžiuliai. Pavyzdžiui, laisvieji elektronai skrieja net 3000–5000 km/s ir dar didesniais greičiais. Daug sunkesnių protonų greičiai siekia 100 ir daugiau km/s. Todėl tarp dviejų gretimų smūgių dalelės suspėja nuskrieti milžiniškus atstumus – elektronai net kelis pc. Tačiau minėtojo dujų lęšio matmenys daug didesni. Vadinasi, dujų dalelės neišvengia kaimynių smūgių. Šitaip jos pasidalija viena su kita savo kinetine energija. Taigi visa šių dalelių visuma, imant labai bendrais bruožais, elgiasi kaip vientisas didžiulis dujų telkinys, kuriam galioja dujų dėsniai. Todėl nežiūrint neįtikėtino retumo galima kalbėti apie vainikinių dujų tankį, temperatūrą, slėgį ir kitus parametrus. Temperatūrą apibrėžia Maksvelo greičių pasiskirstymo dėsnis, kuris tinka beveik visose tarpžvaigždinės medžiagos vietose. Taip apibrėžta temperatūra vadinama ***kinetine temperatūra***, žymima T_k.

Tarpžvaigždinių vainikinių dujų kinetinė temperatūra skirtingose vietose gana nevienoda, tačiau visur labai aukšta: maždaug nuo 0,5 iki 3 milijonų kelvinų. Kaip tik šitoks karštis ir lėmė pavadinimą „vainikinės dujos". Juk ir Saulės vainike yra toks pat karštis. Labai aukštos vainikinių dujų temperatūros priežastis yra supernovų sprogimai.

Nežiūrint milžiniškos kinetinės temperatūros, vainikinių dujų apsuptyje kietasis kūnas, atsidūręs toli nuo žvaigždžių, turi patirti ne karštį, o šaltį. Mat dujų dalelės yra taip toli viena nuo kitos, jų smūgiai tokie reti, kad jie kietajam kūnui suteikia visiškai mažai energijos. Kietojo kūno temperatūra turi siekti tik kelis ar keliasdešimt kelvinų. Taigi labai praretintose dujose temperatūros sąvoka nėra vienareikšmė. Tai tinka ne tik vainikinėms dujoms,

bet ir visai tarpžvaigždinei medžiagai, net jei dujų tankis milijonus ar milijardus kartų didesnis.

Dėl didžiulių vainikinių dujų dalelių greičių, kuriais paaiškinama milijonų laipsnių kinetinė temperatūra, kyla labai stiprūs smūgiai, pajėgiantys jonizuoti susidurinčias daleles. Dėl to vainikinėse dujose yra jonizuoti visi vandenilio atomai. Vietoj helio atomų irgi likę tik pliki jų branduoliai, praradę savo abu elektronus. Sunkesnieji atomai jonizuoti po 3–8 kartus.

Milijonų laipsnių karščio, tačiau labai mažo tankio vainikinių dujų plazmoje vyrauja vadinamasis ***stabdomasis spinduliavimas***. Būtent laisvieji elektronai, sąveikaudami su protonais, o dar geriau – su sunkesnių cheminių elementų atomais ir jonais, didelę savo kinetinės energijos dalį gali prarasti iš karto, vienintelės sąveikos metu. Galima sakyti, kad šiuo atveju elektronai atsitrenkia į sunkesnes daleles ir yra stabdomi. Prarastoji elektronų energija išsisklaido spinduliais, ypač Rentgeno srities.

Taigi vainikinės dujos yra apyskaidris (dėl nepaprastai mažo tankio) labai karštų dujų telkinys, skleidžiantis **šiluminės kilmės** ištisinio spektro spindulius, kurių energijos maksimumas turi būti Rentgeno srityje. Elektronų laisvieji šuoliai sukuria ištisinį spektrą pradedant radijo bangomis ir baigiant UV spinduliais. Vykstant stabdomajam spinduliavimui, pažeriami ištisinio spektro Rentgeno spinduliai. Tačiau visa tai vainikinės dujos dėl savo didelio skaidrumo spinduliuoja labai silpnai. Pavyko užregistuoti tik Rentgeno spindulius. Kitų spektro sričių silpnus vainikinių dujų spindulius ir radijo bangas užgožia kitų šaltinių skleidžiamos elektromagnetinės bangos.

Vainikinių dujų teigiamieji jonai UV ir Rentgeno srityje turi skleisti daugybę atskirų emisijos linijų. Tačiau jos visiškai silpnutės ir stebėjimams neprieinamos.

Užtat kai kurie vainikinių dujų jonai praskriejančioje labai tolimų žvaigždžių šviesoje geba palikti savo sugerties linijas. Daugiausia stebėtos ir geriausiai ištirtos yra penkis kartus jonizuoto deguonies, žymimo O VI, 103,76 nm bei 103,19 nm, ir keturis kartus jonizuoto azoto N V 124,28 nm bei 123,88 nm sugerties linijos.

Dėl didelių šiluminių greičių vainikinės dujos neišsitenka anksčiau minėtame tarpžvaigždinės medžiagos lęšio tūryje. Greitai besiblaškydamos dujų dalelės įveikia ties pagrindine Galaktikos plokštuma labiausiai susibūrusių žvaigždžių bei tarpžvaigždinės medžiagos trauką ir, palaipsniui retėdamos, pasiekia keliolikos ar net kelių dešimčių tūkstančių pc atstumus nuo pagrindinės plokštumos, užpildo visą Galaktikos sferoido tūrį. Todėl vainikinių dujų skleidžiami ištisinio spektro Rentgeno spinduliai mus pasiekia iš visų pusių, tiesiog juos spinduliuoja visas dangus.

Vainikinės dujos, nors ir užima didžiulį tūrį, tesudaro tik nedidelę visos tarpžvaigždinės medžiagos masės dalį. Didžioji tarpžvaigždinės medžiagos dalis nėra tokia karšta, o greičiau atvirkščiai – daugelyje vietų ji netgi labai

šalta ir tamsi. Taip pat ir jos tankis daug didesnis – šimtus, tūkstančius, milijonus, pagaliau milijardus kartų. (Nereikia užmiršti, kad net ir paties didžiausio tankio tarpžvaigždinės medžiagos sutankėjimai, matuojant žemiškais mastais, yra beveik tuštuma, tiksliau – retmė, daug tuštesnė už geriausius mūsų laboratorijų vakuumus).

6.1.3. Difuziniai debesys ir jų aureolės

Tarpžvaigždinės medžiagos debesys yra daug didesnio tankio dujų telkiniai su nedidelėmis dulkelių priemaišomis, susibūrę į minėtąjį tarbžvaigždinės medžiagos lęšį ties pagrindine Galaktikos plokštuma ir čia lyg kokios salos plūduriuojantys mažesnio tankio vainikinių dujų terpėje. Todėl iš Žemės jie matomi beveik vien tik Paukščių Tako kryptimi. Išimtį sudaro tik labai negausūs pavieniai greitieji debesys, dėl savo didelio greičio atsidūrę sferoido tūryje, toli nuo pagrindinės Galaktikos plokštumos. Daugeliui jų didelį greitį galėjo suteikti supernovų sprogimai, tolimoje praeityje daug dažnesni negu dabar. Debesis gaubia didžiulės aureolės, kuriose dujų tankis užima tarpinę padėtį tarp vainikinių dujų ir debesų tankio. Debesys esti nepaprastai įvairūs, tačiau apytikriai jie grupuojami į dvi rūšis – ***difuzinius*** ir ***molekulinius debesis.*** Tiesa, daugybės tarpinio pobūdžio debesų priskyrimas vienai ar kitai rūšiai yra gerokai sąlyginis ir subjektyvus. Savo ruožtu molekuliniai debesys vėlgi skirstomi į dvi rūšis – ***paprastuosius*** ir ***didžiuosius molekulinius debesis.***

6.1.3 skirsnelis skirtas difuziniams debesims ir jų aureolėms, o molekulinius debesis aptarsime **6.1.4** skirsnelyje.

Debesų pasiskirstymas lęšio viduje atspindi Galaktikos spiralinę struktūrą. Spiralinėse vijose debesų daug daugiau, jie vidutiniškai didesnio tankio. Debesų aureolės taip pat didesnio tankio. Daug kur atskiros aureolės tiesiog susiliejusios viena su kita ir sudaro ištisą tarpdebesinį kontinuumą. Dėl to debesų aureolių dujos dar vadinamos ***tarpdebesinėmis dujomis.*** O vainikinėms dujoms spiralinėse vijose vietos mažoka. Daug kur jos nebesudaro ištisos terpės, o tik atskirus koridorius, tokias daug tuštesnes kavernas, arba olas.

Kas kita tarpuose tarp spiralinių vijų. Debesų čia daug mažiau, o ir tie patys mažesnio tankio. Debesų aureolės taip pat mažesnio tankio. Daugelyje vietų jos nebesusilieja tarpusavyje palikdamos daug vietos vainikinėms dujoms.

Spiralinėse vijose esančių difuzinių debesų skersmenys siekia nuo vieno iki keliolikos, o kartais ir iki kelių dešimčių pc. Tokiame debesyje viename cm^3 yra 10–50 atomų. Viso debesies masė kelis kartus ar net kelis tūkstančius kartų didesnė už Saulės masę. Debesies viduje viešpatauja baisus šaltis – kinetinė temperatūra tik apie 60–120 K. Pasitaiko ir ne tokių šaltų difuzinių debesų. Aureolėse apie debesis dujų koncentracija $n \approx 0{,}1$–$0{,}4$ atomo cm^{-3}. Kinetinė temperatūra sudaro 8000–10 000 K.

Tarpuose tarp spiralinių vijų difuzinių debesų $n \approx 2$–10 atomų cm^{-3}. Temperatūra šiek tiek didesnė nei 100 K. Aureolėse apie debesis $n \approx 0{,}02$–0,08 atomo cm^{-3}. Temperatūra siekia 12 000–14 000 K. Į tokią aureolę (gal į vanikines dujas?) yra lakinai patekusi ir Saulė.

Matome, kad šaltus difuzinius debesis supa apykarštės aureolės, o pastarąsias – itin karštos vainikinės dujos. Visuose šiuose trijuose tarpžvaigždinės medžiagos komponentuose dujų slėgis turi būti maždaug vienodas. Kitaip vieni komponentai plėstųsi, kiti būtų suspaudžiami, kol galų gale slėgis išsilygintų. Iš fizikos žinome, kad dujų slėgis lygus koncentracijos n, Bolcmano konstantos k ir temperatūros T sandaugai:

$$p = nkT. \tag{6.1}$$

Įrašius į (**6.1**) anksčiau minėtas apytiksles vidutines skaitmenines n ir T reikšmes, gaunama, kad difuziniuose debesyse, jų aureolėse ir vainikinėse dujose slėgis yra maždaug vienodas ir sudaro 10^{-19}–10^{-18} atm. Žemės sąlygoms tai neįsivaizduojamai mažas slėgis. Tačiau jis reguliuoja tarpžvaigždinės medžiagos struktūrą. Aureolėse dujų koncentracija yra apie 120 kartų mažesnė negu debesyse, o temperatūra – tiek pat kartų aukštesnė. Vainikinės dujos vėlgi apie šimtą kartų retesnės ir karštesnės už debesų aureolių dujas. Sandauga nT lieka maždaug pastovi. Spiralinių vijų difuziniuose debesyse ir jų aureolėse ši sandauga, taigi ir dujų slėgis, maždaug 5 kartus didesnis negu tarpuose tarp vijų. Mat daugelio galaktikų spiralinės vijos – tai per visą galaktikos diską plintančios padidinto tankio ir slėgio bangos.

6.1.4. Molekuliniai debesys ir superdebesys

Difuziniai debesys sudaryti beveik vien tik iš dujų atomų. Į molekules (ir tai tik dviatomes, pačias nesudėtingiausias) tėra susijungusi tik kokia tūkstantoji ar vos milijoninė visų atomų dalis. Mikroskopinių dulkelių ten irgi labai mažai. Dažniausiai kuo debesis didesnio tankio, tuo didesnis jo atomų procentas susijungęs į molekules. Tokiame debesyje daugiau ir dulkelių.

Maždaug nuo 1970 m. palaipsniui pradėjo ryškėti, jog esama ir daug stambesnių bei didesnio tankio debesų, kuriuose į molekules (kartais ir labai sudėtingas) susijungusi didesnė pusė arba net per 95% visų atomų (žinoma, išskyrus helį ir kitas inertines dujas, kurios nesijungia į molekules).

Tai ***molekuliniai debesys.*** Jie skirstomi į ***paprastuosius*** ir ***didžiuosius molekulinius debesis.*** Jų masė prilygsta visų atominių tarpžvaigždinių dujų masei. Taigi, atradus molekulinius debesis, paaiškėjo, kad tarpžvaigždinės medžiagos masė besanti maždaug dvigubai didesnė, negu iki tolei buvo galvojama. Visos tarpžvaigždinės medžiagos mūsų Galaktikoje masė $M = 10^{10} M_\odot$ (Saulės masių).

Ypač įspūdingi yra *didieji molekuliniai debesys*. Jų masės $10^5 M_\odot$ ar didesnės, skersmenys – dešimtys pc ar net per 100 pc. Tokių debesų Galaktikoje esama apie 6000. Juose telpa 90% visų Galaktikos molekulinių dujų. Iš jų 30% molekulinių dujų suplūdusios į 1000 tokių gigantiškų debesų, kurių kiekvieno masė $M \geq 10^6 M_\odot$.

Didžiųjų molekulinių debesų forma netaisyklinga, jie visaip išsidraikę ir išsišakoję, jų vidaus sandara sudėtinga, su įvairaus masto matomais sutankėjimais, lyg kažkokiais branduoliais, o vietomis ir mažesnio tankio retmėmis. Dėl to šie debesys dar vadinami ***molekulinių debesų kompleksais,*** tuo išreiškiant mintį, kad galbūt tai yra visiškai suartėjusių, tiesiog susijungusių atskirų debesų grupės.

Daugumoje debesies vietų viename cm^3 telpa keli šimtai molekulių. O sutankėjimuose koncentracija siekia tūkstančius, milijonus, kai kur net milijardus molekulių viename cm^3. Čia ir dulkelių labai daug. Praeinančią šviesą jos susilpnina milijonus ar milijardus kartų. Už jų visiškai nematyti žvaigždžių ir kitų spinduolių. Taigi ten labai nejauku – baisiai šalta ir visiškai tamsu, nesimato net žvaigždėto dangaus. Kinetinė temperatūra molekulinių debesų sutankėjimuose vos 5–30 K, mažesnio tankio srityse – 10–40 K.

Daugelio didžiųjų molekulinių debesų didžiausio tankio vietose formuojasi naujos žvaigždės – vyksta ***žvaigždėdara***. Naujagimės žvaigždės, ypač pačios masyviausios ir karščiausios, savo spinduliais, galingu vėju, medžiagos čiurkšlėmis ir fontanais labai suaudrina aplinkinę tarpžvaigždinę medžiagą. Dėl to už kelių parsekų nuo naujagimių žvaigždžių dujų temperatūra pakyla iki keliolikos ar keliasdešimt K, o daug arčiau – net iki šimtų ar tūkstančių K. Dabartiniu metu mūsų Galaktikoje 70% naujų žvaigždžių susidaro spiralinėse vijose, 10% tarpuose tarp vijų, dar 10% Galaktikos centro aplinkoje ir dar 10% atokiau nuo Galaktikos pagrindinės plokštumos. Todėl spiralinėse vijose molekuliniai debesys dėl juose daug gausesnių žvaigždėdaros lizdų yra vidutiniškai ne tokie šalti kaip tarpuose tarp vijų. Pačios šalčiausios visoje Galaktikoje vietos yra tokių didžiųjų molekulinių debesų tankmės, kuriose dar neprasidėjo žvaigždėdara.

Paprastieji molekuliniai debesys savo parametrais užima tarpinę padėtį tarp didžiųjų molekulinių debesų ir difuzinių H I debesų. Galaktikoje jų turėtų būti per 20 000. Jiems tenka vos apie 10% visų Galaktikos molekulinių dujų. Galaktikos dujų lęšyje jie išsidėstę panašiai kaip ir difuziniai H I debesys – jų daugiau spiralinėse vijose, ypač toliau nuo centro, Saulės orbitos išorėje. Tiesa, jie labiau laikosi pagrindinės Galaktikos plokštumos, todėl išsitenka šiek tiek plonesniame dujų lęšyje negu difuziniai H I debesys.

O didžiųjų molekulinių debesų dauguma aptinkama tik centrinėje pagrindinės Galaktikos plokštumos dalyje – Saulės orbitos viduje. Čia jie susispietę į dvi didžiules sritis – 1 kpc spinduliu Galaktikos centrą gaubiantį ***centrinį molekulinį diską*** ir maždaug 3 kpc nuotolyje nuo Galaktikos centro palaipsniui

prasidedantį ir 7 kpc nuotolyje iš lėto sunykstantį ***molekulinių debesų žiedą***. Šis diskas ir žiedas yra gana ploni – vos 80–120 pc storio. Tokiame storyje išsitenka praktiškai vos vienas debesis. Vadinasi, ir diską, ir žiedą galima laikyti vieno debesies storio sluoksniais. Minimas molekulinių debesų žiedas yra pagrindinė tarpžvaigždinės medžiagos saugykla Galaktikoje. Čia telpa 80% visų Galaktikos molekulinių dujų, o tai ir visos tarpžvaigždinės medžiagos didžioji dalis.

Centrinio molekulinio disko orientacija nevisiškai sutampa su pagrindine Galaktikos plokštuma – diskas pakrypęs 7° kampu. Jį iš visų pusių gaubia storesnis ir platesnis diskas iš difuzinių H I debesų. Įdomu, kad šis H I diskas yra dar labiau pakrypęs pagrindinės Galaktikos plokštumos atžvilgiu – net 30°. Matyt, tai atsitiko dėl buvusių galaktikų susidūrimų.

Vietomis Galaktikos spiralinėse vijose, ypač tose jų atkarpose, kurios praeina pro molekulinių debesų žiedą, o kai kur ir tarpuose tarp spiralinių vijų, taip pat arti Galaktikos centro molekuliniai debesys su savo atominių dujų apvalkalais, taipogi ir atskiri difuziniai H I debesys yra susibūrę į didžiulius kompleksus, kur jie daugelyje vietų tiesiog susilieja. Tokie debesų konglomeratai pavadinti ***superdebesimis***. Dažniausiai jie esti iki 1 kpc išsitempę išilgai spiralinių vijų. Jų storis ne didesnis nei viso Galaktikos dujų lęšio storis ir sudaro 100–200 pc.

Jei tokių pailgų superdebesų pasitaiko tarpuose tarp spiralinių vijų, Galaktikos disko sukimosi greičio nevienodumas skirtinguose nuotoliuose nuo centro juos išriečia į laikinas papildomas spiralinių vijų atkarpas. Tokios prisiraizgusios papildomos atkarpos kai kuriose spiralinėse galaktikose labai painioja tvarkingą spiralinių vijų struktūrą.

Kaip prisimename iš **6.1.3** skirsnelio, vidutinis dujų tankis spiralinėse vijose esančiuose difuziniuose debesyse yra apie 5 kartus didesnis negu tarpuose tarp vijų esančiuose difuziniuose debesyse. Bet tai dar ne viskas. Vidutinis visos tarpžvaigždinės medžiagos tankis spiralinėse vijose dar kelis kartus padidėja dėl čia esančių superdebesų su molekuliniais debesimis, dėl pavienių molekulinių debesų, taip pat dėl pavienių difuzinių debesų gausumo.

Kaip matome iš (**6.1**), slėgis molekuliniuose debesyse daug didesnis negu jų aplinkoje. Juk molekuliniai debesys už difuzinius šaltesni vos kelis ar keliolika kartų, kai dujų koncentracija juose didesnė dešimtimis, šimtais, tūkstančiais, net milijonais kartų. Tačiau molekuliniai debesys vis tiek nesiplečia. O nemaža jų dalis netgi traukiasi. Taip yra dėl gana stiprios šių debesų vidinės gravitacijos jėgos.

Dar 1902 m. anglų fizikas ir astronomas D. Džinsas (*J. H. Jeans*), pratęsdamas I. Niutono (*I. Newton*) idėją, matematiškai įrodė, kad dujų telkinys, veikiamas dujų dalelių tarpusavio traukos, ima trauktis ir tankėti, jei jo masė, išreikšta Saulės vienetais,

$$M > M_J = 2{,}6 \cdot 10^{-10} T^{3/2} \rho^{-1/2} = 200 T^{3/2} n_1^{-1/2} = 140 T^{3/2} n_2^{-1/2}; \quad (\mathbf{6.2})$$

čia M_J – vadinamoji ***Džinso,*** arba ***ribinė masė***, T – dujų temperatūra, ρ – jų tankis, n_1 – dujų koncentracija, kai didelę daugumą dujų sudaro vandenilio atomai, n_2 – koncentracija, kai vyrauja vandenilio molekulės. (**6.2**) nelygybė vadinama ***Džinso gravitacinio nestabilumo sąlyga*** (arba kriterijumi). Kitu pavidalu ta pati sąlyga pateikta (**5.70**) nelygybėje.

Taigi nemažai molekulinių debesų atitinka Džinso nestabilumo sąlygą (**6.2**) ir iš lėto traukiasi. Dėl to mažėja jų potencinė energija, vadinasi, turi kilti jų temperatūra. Tačiau ji nekyla, o neretai netgi krinta. Mat, didėjant tankiui, debesis ima vis stipriau skleisti infraraudonuosius spindulius ir radijo bangas šitaip prarasdamas vis daugiau savo šiluminės energijos. Tuo būdu (**6.2**) nelygybę atitikti darosi vis lengviau, ir tai ima galioti net atskiriems sutankėjimams debesies viduje. Tuomet tie sutankėjimai ima trauktis ir skaldytis į vis smulkesnius fragmentus. Toks skaldymasis nutrūksta, kai fragmentų vidus dėl padidėjusio tankio pagaliau darosi neskaidrus net IR spinduliams, ir dėl to ima smarkiai šilti. Toliau traukdamiesi, dauguma fragmentų virsta žvaigždėmis. Vadinasi, kai kurių molekulinių debesų didžiausio tankio vietose vyksta ***žvaigždėdara***, ten formuojasi nauji žvaigždžių spiečiai ir įvairios grupės.



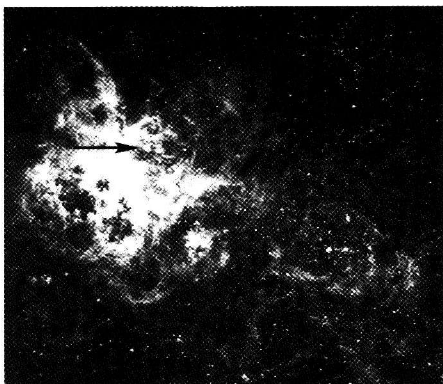
6.4 pav. *Emisiniai ūkai Šiaurės Amerika, arba NGC 7000 (kairėje), ir Pelikanas, arba IC 5067–70, Gulbės žvaigždyne. Juos skiria tamsūs ūkai – dalis didžiulio molekulinių debesų komplekso, kurio į mus atgręžtame pakraštyje ir glaudžiasi abu šviesieji ūkai*

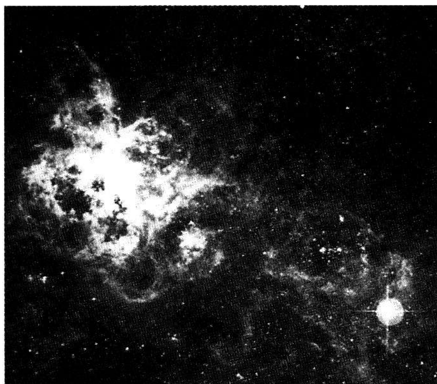
Reikia pastebėti, kad, praktiškai skaičiuojant, (6.2) sąryšyje pateiktą Džinso masės vertę tenka gerokai padidinti, nes gravitacijos jėgai priešinasi ne tik dujų slėgio gradientas, bet ir debesies, o vėliau jo fragmento sukimasis apie savo ašį, jo magnetinis laukas (vadinamasis ***magnetinis slėgis***), gausios ir stiprios turbulentinės srovės bei sūkuriai jo viduje (vadinamasis ***kinematinis slėgis***).

6.2. EMISINIAI ŪKAI

Jų švytėjimo priežastis – labai karštų žvaigždžių sukelta difuziniuose ir molekuliniuose debesyse esančio vandenilio, o neretai ir helio jonizacija. Dėl tos pačios priežasties švyti ir planetiškieji ūkai. Abiejų rūšių ūkų švytėjimo teorijos pagrindus XX a. trečiajame dešimtmetyje sukūrė olandų astrofizikas Hermanas Zanstra ir danų astrofizikas Bengtas Striomgrenas (*B. G. D. Strömgren*). Jie įrodė, kad švytėjimui energiją teikia arti esančios karštos žvaigždės arba tų žvaigždžių grupės patys trumpiausieji ultravioletiniai spinduliai.

Visa, kas šiame poskyryje bus pasakyta apie emisinius ūkus, tinka ir planetiškiesiems. Skirtumas tik tas, kad planetiškieji ūkai vidutiniškai truputį didesnio tankio ir todėl šiek tiek skaisčiau švyti. Juos jonizuojančios žvaigždės dažniausiai yra karštesnės, labiau jonizuoja įvairių cheminių elementų atomus,





6.5 pav. *Gigantiškas emisinis ūkas Tarantulas, arba NGC 2070, arba Aukso Žuvies 30 (30 Dor), Didžiojo Magelano Debesies galaktikoje. Jo skersmuo, neskaitant blankiau švytinčio jo tęsinio dešinėn apačion, per 300 pc. Jei jis būtų Didžiojo Oriono ūko nuotolyje (460 pc), danguje užimtų net per 30°. Anglijos ir Australijos Šmidto teleskopo (1,2 m) nuotraukos: dešiniojoje matosi maksimaliai sužibusi 1987 m supernova, o kairiojoje – jos dar nėra. Ūko centre formuojasi labai gausus ir kompaktiškas (gal būsimasis kamuolinis?) žvaigždžių spiečius, žymimas R 136. Čia jau slypi keliolika tūkstančių 1–3 mln. metų amžiaus žvaigždžių. Tarp jų bent 100 yra tokių, kurių kiekvienos masė $M > 100\ M_{\odot}$. Rodyklė rodo apie 10 kartų senesnį padrikajį spiečių Hodge 301. Jame praeityje jau būta supernovų sprogimų. Tai liudija* **27s** *pav. gerai matomi supernovų likučių ūko pluoštai ir iš ten sklindantys Rentgeno spinduliai bei sinchrotroninės kilmės radijo bangos (dar žr.* **8.14** *ir* **37s** *pav.)*

palaiko aukštesnę temperatūrą ūke. Pavyzdžiui, emisiniams ūkams labiau būdinga vienkartinė negu dukartinė He jonizacija, o planetiškiesiems ūkams – atvirkščiai. Kai kurių planetiškųjų ūkų spektruose matosi net Ne V ar Ni VII emisijos linijos. Tuo būdu emisijos linijų gausumu ir įvairove planetiškieji ūkai dažniausiai pralenkia emisinius ūkus. Antra vertus, planetiškieji ūkai yra mažesnių matmenų, daug kompaktiškesni už daugelį emisinių ūkų.

6.2.1. H II sritys

Fotonų sukeltos dujų jonizacijos energijos balansą nusako Einšteino formulė:

$$E_{\mathrm{f}} = h\nu = \chi + \frac{m_e v^2}{2}, \qquad (6.3)$$

čia E_{f} yra atomą jonizavusio fotono energija, χ – atomo jonizacijos potencialas. Matome, kad jonizacijos metu sugertojo fotono energijos dalis sunaudojama elektronui atplėšti, o likusioji dalis virsta atplėštojo elektrono kinetine energija. Daužydamiesi su kitomis dujų dalelėmis, atplėštieji elektronai ją paverčia visos jonizuotosios srities šilumine energija. Kuo karštesnės žvaigždės fotonai jonizuoja dujas, tuo aukštesnė kinetinė tempratūra nusistovi tose dujose.

Tarpžvaigždinėse dujose negalioja arba ne visai galioja Bolcmano dalelių pasiskirstymo energijos lygmenyse dėsnis, nes ten labai reti dujų dalelių tarpusavio smūgiai ir mažai šviesos kvantų. Todėl aukštesniuosiuose energijos lygmenyse atomų visada esti daug mažiau, negu reikėtų pagal Bolcmano dėsnį. (*Kodėl ten galioja Maksvelo greičių pasiskirstymo dėsnis, nors Bolcmano dėsnis negalioja?*) Beveik visi tarpžvaigždinėje erdvėje esantys neutralūs vandenilio ir helio atomai nesužadinti, jie yra pagrindiniame energijos lygmenyje.

Vandenilį iš pagrindinio lygmens geba jonizuoti visi tie fotonai, kurių energija ne mažesnė už vandenilio jonizacijos iš pirmojo lygmens potencialą χ_1: $E = h\nu \geq \chi_1 = 13{,}6$ eV. O tai yra tolimosios ultravioletinės srities fotonai. Jų bangų ilgis lygus arba trumpesnis už Laimano serijos ribą, kurios $\lambda = 91{,}15$ nm. Tokius energingus fotonus, žymimus L_s, pakankamai gausiai skleidžia tik pačios karščiausios O–B2 spektrinių klasių žvaigždės. Jų fotosferų temperatūra siekia 25 000–50 000 K.

Tarpžvaigždinėje medžiagoje rekombinacijos aktai vyksta nepaprastai retai. Juk atskiros dujų dalelės – molekulės, atomai, jonai, protonai, elektronai – retai tesusiduria. Smūgį iš gretimos dujų dalelės jie gauna tik kartą per kelias minutes, mėnesius, metus, šimtus metų. Ir tik dalis teigiamo jono ar protono artimų susidūrimų su elektronu baigiasi rekombinacija. Vadinasi, atplėštas nuo atomo elektronas gali išbūti laisvas metų metais ar net šimtus tūkstančių metų, kol pagaliau jį pasigrobia koks nors teigiamai elektringas jonas. Vidutinė trukmė tarp jonizacijos ir rekombinacijos, išreikšta sekundėmis, apskaičiuojama remiantis šia teorinės fizikos pateikiama priklausomybe:

$$\tau = \frac{10^{13}}{n_e}, \quad (6.4)$$

čia n_e yra laisvųjų elektronų koncentracija, t. y. laisvųjų elektronų skaičius viename kubiniame centimetre. Pavyzdžiui, vidutinio skaisčio emisiniame ūke $n_e \approx 10^3$ cm^{-3}. Vadinasi, $\tau \approx 10^{10}$ s, o tai sudaro apie 1000 metų.

Aplink karščiausias žvaigždes, kur pakankamai daug L_s spindulių, neutralioje būsenoje vandenilio atomai išbūna tūkstančius kartų trumpiau negu jonizuoti. Mat jonizacijai nereikia laukti labai retų gretimų dalelių smūgių – jonizuoja pralekiantys L_s fotonai. Ten jonizuotų vandenilio atomų visada yra tūkstančius kartų daugiau negu nejonizuotų. Dėl to tokios vietos vadinamos jonizuoto vandenilio sritimis ir žymimos **H II**. Dar jos vadinamos ***Striomgreno zonomis***. Būtent tai ir yra **dujų švytėjimo sritys.** Jei H II sritį sudaro molekulinio ar bent difuzinio debesies dalis, tai tokia sritis gana skaisčiai švyti ir vadinama ***emisiniu ūku***. Tačiau jei H II sritis nusitęsia per difuzinio debesies aureolę, tai dėl labai mažo dujų tankio jos skaistis yra visiškai menkas, ji švyti labai blausiai, ir matoma tik ypač ilgos ekspozicijos nuotraukose, o dar geriau naudojant kurios nors stiprios emisijos linijos monochromatinius spindulius.

Daugelyje H II sričių būdinga 7–10 tūkstančių kelvinų kinetinė temperatūra. O tai reiškia, kad elektronų šiluminių judesių vidutiniai greičiai yra apie 500 km/s. Prie pačių karščiausių žvaigždžių, pajėgiančių skleisti ypač didelių energijų fotonus, jonizuotos tarpžvaigždinės medžiagos kinetinė temperatūra siekia $15 \cdot 10^4$ K. Tačiau jei patektume į emisinį ūką, vis tiek būtų labai šalta, nes vienetiniame tūryje dalelių labai nedaug ir jų smūgiai tesuteiktų visai mažai energijos. Pavyzdžiui, emisiniuose ūkuose esančios mikroskopinės dulkelės teįšyla tik iki kelių dešimčių K. Tai patvirtina skleidžiami silpni šiluminės kilmės ištisinio spektro infraraudonieji (IR) spinduliai.

6.2.2. Emisinių ūkų šiluminės kilmės radijo bangos

Tapę laisvais, elektronai H II srityse atlieka laisvuosius šuolius šiluminės energijos sąskaita skleisdami stiprias ištisinio spektro metrines ir trumpesnes radijo bangas. Sparčiai silpnėjantis šios prigimties spektras nusidriekia ir per visą infraraudonąją sritį kartais pasiekdamas ir regimuosius spindulius.

Kelių metrų ir kelių decimetrų ilgio bangoms emisiniai ūkai yra visiškai neskaidrūs, ir todėl jas spinduliuoja visiškai taip, kaip spinduliuotų 7000–15 tūkst. K temperatūros idealusis spinduolis (absoliučiai juodas kūnas). Jo spinduliavimą aprašanti Planko lygtis radijo srityje turi daug paprastesnį pavidalą. Būtent ***skaisčio spektrinis tankis*** (vienetinio ploto, statmeno stebėjimo krypčiai, per vienetinį laiką stebėtojo kryptimi į vienetinį erdvinį kampą išspinduliuojama energija, telpanti vienetiniame dažnių intervale ties dažniu ν)

$$B_\nu = \frac{2kT\nu^2}{c^2}. \qquad (6.5)$$

Tai yra vadinamoji ***Reilio ir Džinso lygtis***, pavadinta anglų fiziko Džono Reilio (*J. W. Rayleigh*) ir anglų fiziko bei astronomo Džono Džinso vardais.

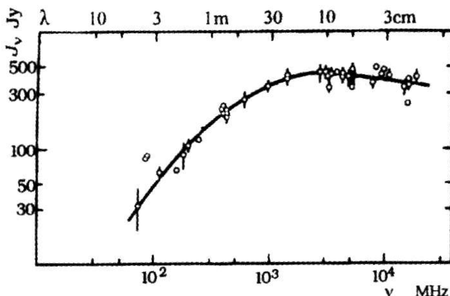
Jei tolimas elektromagnetinių bangų šaltinis iš Žemės atrodo kaip spinduliuojanti dėmė danguje (kaip tik tokie yra emisiniai ūkai), tai

$$B_\nu = \frac{J_\nu}{\omega}; \qquad (6.6)$$

čia J_ν yra tiriamojo objekto ***spindesio spektrinis tankis*** (į šį objektą nukreiptos aparatūros vienetinio ploto per vienetinį laiką priimama vienetinio dažnių intervalo energija), ω – erdvinis kampas, kuriuo iš Žemės matome tiriamąjį objektą. Radijo diapazone J paprastai matuojamas janskiais (Jy). $1\ \text{Jy} = 10^{-26}\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$. Iš (**6.6**) ir (**6.5**) gauname:

$$T = \frac{c^2 J_\nu}{2k\omega\nu^2}. \qquad (6.7)$$

Taigi, išmatavus radijo spindesio spektrinį tankį, galima apskaičiuoti emisinių ūkų temperatūrą. Šitaip apkaičiuotą temperatūrą vadiname ***skaistine*** ir žymime T_b. J_ν matuojamas keliose skirtingose metrinio ir decimetrinio diapazono vietose. Dažniausiai visi šie matavimai duoda maždaug tą pačią T_b vertę. Tuomet galime būti tikri, kad tiriamoje atkarpoje galioja Reilio ir Džinso lygtis (**6.5**), vadinasi, tiriamoji ūko vieta neskaidri savo pačios skleidžiamoms radijo bangoms. O skaistinė temperatūra tuomet lygi tiriamosios vietos dujų kinetinei temperatūrai T_k, nusakančiai dujų dalelių šiluminio blaškymosi greičius.



6.6 pav. *H II srities – Didžiojo Oriono ūko – radijo diapazono energijos kreivė – apyskaidrio spinduolio pavyzdys. Spinduliuoja elektronai, atlikdami laisvuosius šuolius ir tuo būdu naudodami ūko šiluminę energiją. Einant trumpųjų bangų link, energijos kreivė pradeda skirtis nuo Planko kreivės ir nustoja kilti dėl vis didesnio debesies skaidrumo savo paties skleidžiamoms radijo bangoms. J_ν – radijo spindesio spektrinis tankis janskiais ($1\ Jy = 10^{-26}\ W\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$), ν – elektromagnetinių virpesių dažnis megahercais*

Tačiau taip yra tik neilgoje ν atkarpoje. Visų emisinių ūkų skleidžiamos energijos kreivės, einant trumpųjų bangų link, decimetriniame diapazone nustoja kilusios. Tai iliustruojama ir **6.6** pav. Vadinasi, nustoja galioti (**6.5**) lygtis, o tai reiškia, kad šioms bangoms emisiniai ūkai ima darytis iš dalies skaidrūs. Kuo trumpesnė banga, tuo jie darosi skaidresni, o jų spinduliavimo geba dėl to vis labiau atsilieka nuo idealiojo spin-

duolio spinduliavimo gebos. Iš (**6.7**) sąryšio formaliai apskaičiuota skaistinė temperatūra T_b pasidaro priklausoma nuo optinio tankio τ_ν:

$$T_b = T_k(1 - e^{-\tau_\nu}). \qquad (6.8)$$

Vadinasi, centimetrinių ir dar trumpesnių radijo bangų diapazonas emisinių ūkų temperatūroms nustatyti nėra tinkamas. Užtat jis pasidaro tinkamas laisvųjų elektronų koncentracijai n_e nustatyti, nes optinis tankis τ_ν priklauso ne tik nuo ν, bet ir nuo n_e. Šiuo atveju tiriamosios ūko vietos kinetinė temperatūra T_k jau turi būti žinoma iš anksto. Ji nustatoma remiantis ne tik metrinių radijo bangų stebėjimais. Tolesniuose skirsneliuose pamatysime, kad emisiniai ūkai skleidžia labai įvairaus bangų ilgių diapazono bei įvairios kilmės ištisinį spektrą ir emisijos linijas. Šių įvairių fotonų stebėjimų analizė atveria daug visai kitokių galimybių temperatūrai nustatyti. Žinant T_k ir nustačius T_b, iš (**6.8**) sąryšio galima apskaičiuoti optinį tankį τ_ν. O remiantis teorine fizika, jau galima iš τ_ν apskaičiuoti ir n_e. Tuo tarpu H II srityse $n_e \approx n_p$. Vadinasi, tiriamosios ūko vietos visų dalelių koncentracija $n \approx 2n_e$. Kai kurių kitų spektro sričių stebėjimai taip pat naudojami tarpžvaigždinių dujų koncentracijai nustatyti.

6.2.3. Emisinių ūkų rekombinacinis spektras

6.2.3.1. Vandenilio ištisinis rekombinacinis spektras

Elektronai spinduliuoja ne tik atlikdami laisvuosius šuolius, bet ir rekombinuodami. Išspinduliuoto fotono energiją nusako ta pati Einšteino formulė (**6.3**). Tik šiuo atveju jos vyksmas yra iš dešinės kairėn. Vykstant masinei vandenilio atomų rekombinacijai į pirmąjį energijos lygmenį, trumpesniųjų bangų pusėje nuo Laimano serijos ribos (λ = 91,20 nm) susidaro ištisinio spektro emisinė juosta, vadinama ***Laimano kontinuumu*** ir žymima $\mathbf{L}_s$, kuri palaipsniui silpnėja į trumpųjų bangų pusę. Kuo dujų kinetinė temperatūra didesnė, tuo lėtesnis tas silpnėjimas.

Jei rekombinacija įvyksta į II energijos lygmenį, tai išspinduliuojama tokia pat į trumpųjų bangų pusę silpnėjanti ištisinio spektro juosta, kurios bangų ilgis mažesnis už Balmerio serijos ribos bangos ilgį λ = 364,60 nm. Ši ištisinio spektro juosta vadinama ***Balmerio kontinuumu*** ir žymima $\mathbf{H}_s$.

Rekombinuojant į III lygmenį, išspinduliuojamų ***Pašeno kontinuumo*** fotonų bangų ilgis trumpesnis už Pašeno serijos ribos bangos ilgį λ = 820,36 nm. Rekombinuojant į IV lygmenį, pasklinda ***Breketo kontinuumo*** infraraudonieji spinduliai, trumpesni už Breketo serijos ribą (λ = 1458,41 nm = = 1,4584 μm), rekombinuojant į V lygmenį – trumpesni už Pfundo serijos ribą (λ = 2,2788 μm), rekombinuojant į VI lygmenį – trumpesni už Hempfrio serijos ribą (λ = 3,2814 μm) ir t. t. Šitokius samprotavimus galima tęsti per

visą infraraudonųjų ir submilimetrinių spindulių sritį paliečiant ir radijo bangas. Visus šiuos spindulius išskleidę į spektrą, matome laiptuotą, labai nelygų ištisinį kontinuumą: einant trumpųjų bangų link, ties kiekvienos serijos riba emisinio ūko skaistis šuoliu padidėja, o paskui iš lėto visai sumažėja vėl staigiai pašokdamas ties kitos serijos riba.

6.2.3.2. Vandenilio emisijos linijos

Iš karto į pirmąjį lygmenį rekombinuoja tik 40% visų rekombinuojančių vandenilio atomų. Apie 60% visų rekombinacijos aktų vyksta į aukštesnius lygmenis. Šiuo atveju susidaro sužadinti H I atomai, atsidūrę II, III ir t. t. energijos lygmenyse. Jie tučtuojau šuoliuoja žemyn – arba iš karto į pagrindinį lygmenį arba įvairiausio didumo pakopomis. Taip sužėri įvairiausių vandenilio serijų praktiškai visos emisijos linijos. Visų šių linijų fotonai, išskyrus Laimano serijos linijų fotonus, laisvai išlekia iš emisinio ūko ir pasiekia Žemę.

Tačiau vykstant šuoliams į pirmąjį lygmenį, skleidžiami Laimano serijos linijų spinduliai (tarp Lα ties $\lambda = 121{,}57$ nm ir serijos ribos), kuriuos tuoj pat sugeria kiti H I atomai, jau anksčiau suspėję atsidurti pirmajame lygmenyje. Šie atomai, sugertosios energijos pakelti į aukštesniuosius energijos lygmenis, tuojau vėl grįžta į pirmąjį, tačiau tik dalis iš jų tiesiogiai, o kiti – pakopomis. Taip vėl pasklinda daugelio vandenilio serijų emisijos linijų spinduliai. Galų gale visi Laimano serijos linijų (išskyrus Lα) fotonai šitaip suskyla į smulkesnius kitų serijų linijų fotonus. Iš vieno Laimano serijos linijų fotono, be kitų serijų fotonų, būtinai susidaro ir vienas Balmerio serijos linijų fotonas.

Tuo būdu iš tam tikros ūko vietos per vieną sekundę išspinduliuotų Balmerio serijos fotonų (įskaitant ir Balmerio kontinuumą) skaičius beveik prilygsta rekombinacijos aktų skaičiui per sekundę. O pastarasis lygus jonizacijos aktų skaičiui per sekundę. Balmerio fotonų skaičių nesunku gauti iš stebėjimo duomenų. Šitaip galima apskaičiuoti jonizaciją sukeliančių žvaigždės tolimųjų ultravioletinių fotonų kiekį. Palyginus šį kiekį su žvaigždės spinduliavimo galia stebėjimams prieinamoje artimojoje ultravioletinėje ir regimosios šviesos srityje, galima dar vienu būdu apskaičiuoti pačių karščiausiųjų O spektrinės klasės žvaigždžių temperatūrą. Tai H. Zanstros pasiūlytasis būdas. Be emisinių ūkų pagalbos žvaigždžių spinduliavimo galios Laimano kontinuumo srityje neišmatuotume, nes tokie trumpi spinduliai Saulės sistemos praktiškai nepasiekia – juos sugeria visur pakely pasitaikantys H I atomai. O emisinis ūkas juos paverčia ilgesniais, pasiekiančiais Žemę ir patogiais registruoti.

6.2.3.3. Dvifotoniai vandenilio šuoliai

Išspinduliavęs Balmerio serijos (įskaitant ir Balmerio kontinuumą) fotoną, vandenilio atomas atsiduria antrajame lygmenyje. Faktiškai vandenilio antrasis lygmuo susideda iš trijų beveik vienodos energijos komponentų: $2s\,^2S_{1/2}$, $2p\,^2P_{1/2}$ ir $2p\,^2P_{3/2}$. Pirmasis lygmuo yra viengubas (neskaitant supersmulkio-

sios struktūros): 1s $^2S_{1/2}$. Lygmuo 2s $^2S_{1/2}$ yra *metastabilus*. Jame atomas nespinduliavęs gali išbūti daugiau kaip 0,1 sekundės. Jei per šį labai ilgą laiką kaimyninių dalelių smūgiai jo iš ten neišmuša, jis pagaliau įvykdo magnetinį dipolinį šuolį 2s $^2S_{1/2} \rightarrow$ 1s $^2S_{1/2}$ vietoj Lα fotono išspinduliuodamas iš karto du fotonus, kurių energijų suma lygi Lα fotono energijai. Geriausi fizikų laboratorijų vakuumai nepakankami tokiam spinduliavimui gauti – jį sužlugdo šiluminiai smūgiai. O štai tarpžvaigždiniuose debesyse, kur smūgiai daug retesni, dviejų fotonų šuoliai vyksta beveik netrukdomi. Šuolio energiją abu fotonai pasidalija labai įvairiai. Dažniausiai vienas fotonas gauna daug didesnę energijos dalį negu kitas. Milijardų milijardai tokių šuolių sukuria ištisinį spektrą, kuris, palaipsniui stiprėdamas, tęsiasi per infraraudonąją, regimosios šviesos ir ultravioletinę spektro sritis pasiekdamas savo energijos maksimumą ties $\lambda \approx 170$ nm. Paskui jis greitai silpnėja ir visiškai išnyksta ties Lα. Šio ištisinio spektro energijos priklausomybės nuo bangos ilgio kreivė panaši į Planko kreivę kai $T = 22\,000$ K. Dvifotonių šuolių ištisinis spektras šiek tiek išlygina laiptuotą ištisinį spektrą, atsirandantį rekombinacijos metu. Kai emisinio ūko kinetinė temperatūra yra 10 000 K, tai vandenilio dvifotoniai šuoliai duoda apie 50% visos vandenilio ištisinio spektro energijos žaliojoje spektro srityje ties $\lambda = 500$ nm, 70% prie pat Balmerio serijos ribos iš ilgosios jos pusės ir tik 17% tuojau už šios ribos.

6.2.3.4. Lα emisijos linija

Šuoliai 2p $^2P_{1/2} \rightarrow$ 1s $^2S_{1/2}$ ir 2p $^2P_{3/2} \rightarrow$ 1s $^2S_{1/2}$ nėra draustiniai. Jie sukuria dvi emisijos linijas, kurių bangų ilgių skirtumas tėra 0,001 nm. Todėl spektre jos abi susilieja ir sudaro vieną rezonansinę vandenilio liniją Lα.

Jau pastebėjome, kad galų gale po vieną Balmerio fotoną išspinduliuoja ir į antrąjį lygmenį patenka visi rekombinavę vandenilio atomai. Iš jų maždaug 1/3 patenka į metastabilųjį 2s $^2S_{1/2}$ komponentą ir sukuria ištisinį spektrą, o 2/3 – į 2p $^2P_{1/2}$ ir 2p $^2P_{3/2}$ komponentus ir sukuria rezonansinę emisijos liniją Lα. Šios linijos spinduliai negali iš ūko laisvai ištrūkti – juos sugauna H I atomai pakildami į 2p $^2P_{1/2}$ ir 2p $^2P_{3/2}$ lygmenis. Tučtuojau seka šuoliai žemyn, vėl atkuriami Lα fotonai, kuriuos vėl sugeria kiti H I atomai. Taip kartojasi milijonus kartų. Čia tarp sugerties ir emisijos aktų nespėja įvykti smūgių su gretimomis detalėmis, todėl fotono energija nevirsta šilumine energija, o tik trumpam pasikeičia į H I atomo sužadinimo energiją. Naujai atkurtasis fotonas išlieka tokios pat energijos, vadinasi, ir tokio pat dydžio kaip ir žuvęs. Pasikeičia tik skriejimo kryptis ir elektromagnetinių virpesių fazė. Tai tolygu fotonų sklaidai. Todėl šitokia sugertis dažnai priskiriama ne prie tikrosios sugerties, o prie fotonų sklaidos reiškinių. Tikrosios sugerties metu fotono energija būtinai turi galų gale virsti šilumine energija, o pastarosios sąskaita turi vėl susidaryti nauji fotonai, bet jau ne tik kitos krypties, bet ir kito dažnio.

Patyrę daugybę sklaidos aktų, daug kartų priversti keisti kryptį ir klajoti po visą ūką, daugelis Lα fotonų pagaliau pasiekia debesų pakraščius ir ištrūksta į

tarpdebesines erdves. Dalis jų atlekia ir iki Žemės. Kaip rašėme **6.2.3.2.** skirsnelyje, kitų Laimano serijos linijų fotonai iš ūko ištrūkti negali. Todėl emisinių ūkų spektruose vietoj visos Laimano serijos mes stebime vien tik Lα emisijos liniją, bet ir tą daugiau ar mažiau apsilpusią dėl susitikimų su H I atomais ir dulkelėmis tiek pačiame ūke, tiek ir pakeliui tarp ūko ir Žemės. (Nepamirškime, kad visas elektromagnetines bangas, kurių $\lambda < 300$ nm, galima stebėti tik iškilus virš Žemės atmosferos.)

Lα fotonams ištrūkti iš ūko ir pasiekti Žemę padeda Doplerio reiškinys. Dėl chaotiškų šiluminių judesių, taip pat dėl atskirų tarpžvaigždinės medžiagos sričių judėjimo viena kitos atžvilgiu Lα fotonus spinduliuoja įvairiomis kryptimis judantys atomai. Todėl Doplerio reiškinys įvairiai pakeičia jų skleidžiamų fotonų bangų ilgius. Lα linija išplinta, įgauna nuo centro ilgųjų ir trumpųjų bangų link toli nusidriekusius sparnus, kurių fotonams ūkas ir pakeliui į Žemę esančios dujos daug skaidresni negu linijos centro fotonams. Mat sunkiau tikėtis, kad pakeliui pasipainiojęs H I atomas judės lygiai taip pat, kaip ir linijos sparno fotoną išspinduliavęs H I atomas. O jei abu šie atomai vienas prie kito artės arba vienas nuo kito tols, pakeliui pasitaikęs atomas jau nebegalės sugerti pralekiančio fotono.

O štai Lα linijos centro fotonų skaičiaus Doplerio reiškinys ne didina, o priešingai – mažina. Dėl Doplerio ir Štarko reiškinių dalis Lα fotonų juos sugėrusius atomus pakelia ne į 2p, o į metastabilųjį 2s lygmenį. Toks fotonas jau nebeatsistato – suskyla į du mažesnės energijos fotonus, laisvai išlekiančius iš ūko.

6.2.3.5. Vandenilio radijo emisijos linijos

Labai įdomus emisinių ūkų reiškinys – vandenilio radijo emisijos linijos. Mat vykstant rekombinacijai, dalis elektronų ima skrieti apie protonus labai tolimomis orbitomis. Taip susidaro labai sužadinti vandenilio atomai, rekombinacijos metu atsidūrę nepaprastai aukštuose energijos lygmenyse, kurių eilės numeris yra nuo kelių dešimčių net iki 200–300. Tarpai tarp tokių aukštų gretimų lygmenų yra visiškai mažyčiai: kuo aukštesnis lygmuo, tuo mažesnis tarpas iki gretimo lygmens. Todėl šuoliai tarp gretimų labai aukštų lygmenų sukuria milimetriniame, centimetriniame ir decimetriniame radijo diapazonuose esančių vandenilio emisijos linijų serijas. Tai vadinamosios ***Ridbergo linijos***, taip pavadintos švedų fiziko D. R. Rydbergo *(J. R. Rydberg)* garbei. Tokių linijų Žemės laboratorijose sukurti neįmanoma. Juk tokiuose aukštuose energijos lygmenyse atsidūrusių atomų skersmenys yra dešimtis tūkstančių kartų didesni negu nesužadintų atomų ir siekia šimtąsias milimetro dalis. Tokie dideli atomai gali susidaryti tik tarpžvaigždinėje retmėje, kur atstumai tarp kaimynų pakankamai dideli. Vandenilio radijo emisijos linijos atneša mums daug informacijos apie fizines sąlygas ir cheminę sudėtį emisiniuose ūkuose. Neretai jos yra vieninteliai žinių šaltiniai apie dulkių klodų nuo mūsų užstotas H II sritis. Mat šviesa pro dulkių klodus nepraeina, o radijo bangos – laisvai praeina.

6.2.3.6. Helio rekombinacinis spektras

Kai kuriose emisinių ūkų vietose arti pačių karščiausių žvaigždžių, o ypač planetiškuosiuose ūkuose, vieną arba net ir du kartus jonizuojamas ir helis. Tik jo jonizacijos energija daug didesnė. Vieną kartą jonizuoti gali tik tokie ultravioletiniai spinduliai, kurių bangos ilgis mažesnis kaip 50,4 nm. Norint helį jonizuoti antrą kartą, turi būti $\lambda < 22{,}8$ nm. Helio rekombinacija ir tolesni pakopiniai arba tiesioginiai šuoliai į žemesnius lygmenis irgi sukuria laiptuotas ištisinio spektro juostas ir emisijos linijų serijas. Šuoliai iš metastabiliųjų lygmenų taip pat yra dvifotoniai, sukuriantys silpną ištisinį spektrą. Štai [He I] draustinis šuolis 2s $^1S_0 \rightarrow$ 1s $^1S_0$ paskleidžia ištisinį spektrą, kurio energijos maksimumas yra ties 77,0 nm. [He I] draustinio šuolio 2s $^3S_1 \rightarrow$ 1s $^1S_0$ ištisinis spektras yra sudėtingos formos su dviem maksimumais ties 70,0 nm ir 240,0 nm. [He II] draustinio šuolio 2s $^2S_{1/2} \rightarrow$ 1s $^2S_{1/2}$ išspinduliuoto ištisinio spektro maksimumas yra ypač tolimoje UV srityje ties 40,0 nm.

Nereikia užmiršti, kad He II ir He I dvifotonio ištisinio spektro nemaža dalis yra Laimano kontinuumo srityje ($\lambda \leq 91{,}15$ nm). O šitokie fotonai yra pajėgūs jonizuoti vandenilį iš pirmojo lygmens ir todėl iš emisinio ūko negali išlėkti. Dėl tos pačios priežasties mūsų taip pat nepasiekia visi tie He I linijų fotonai, kurie pažyra vykstant šuoliams į He I apatinį lygmenį $1s^2\ ^1S_0$. Iš He II paskleistų emisijos linijų mūsų nepasiekia visos pirmosios serijos linijos, sukuriamos šuolių į apatinį energijos lygmenį. Jų visų $\lambda \leq 30{,}4$ nm, todėl jos iš pirmo lygmens gali jonizuoti ne tik H I, bet ir He I. Kas antra He II antrosios serijos linija taip pat iš ūko negali išsiveržti, nes jų bangų ilgiai sutampa su Laimano serijos linijų bangų ilgiais.

Taigi ne visas helio spektras yra prieinamas Žemės stebėtojui. Tačiau net ir tie emisijos linijų ir ištisinio spektro fotonai, kurie be kliūčių pasiekia Žemę, nėra labai gausūs. He I ir He II emisijos linijos ir ištisinis spektras yra daug silpnesni už H I emisijos linijas ir ištisinį spektrą. Mat He II, o dar labiau He III sritys dėl jonizacijos sunkumo visada (ypač emisiniuose ūkuose) esti daug mažesnės už H II sritis. Taip pat helio atomų yra apie 10 kartų mažiau negu vandenilio atomų.

Čia aprašytą emisinių ir planetiškųjų ūkų švytėjimą (išskyrus elektronų laisvųjų šuolių sukurtą švytėjimą) sukelia vandenilio ir helio atomų rekombinacija. Todėl šis švytėjimas, jo ištisinis spektras, jo emisijos linijos atitinkamai vadinami ***rekombinaciniu švytėjimu, rekombinaciniu spektru, rekombinacinėmis emisijos linijomis***.

Sunkesnių už helį atomų visiškai nedaug, todėl jų rekombinacinės linijos labai silpnos, dažnai visai nesusekamos.

Savotišką netiesioginį ryšį su rekombinaciniu spektrinių linijų susidarymo mechanizmu turi kai kurios O III ir N III emisijos linijos, sukurtos fluorescesijos mechanizmo. Būtent dėl atsitiktinio beveik tikslaus energijos lygmenų aukščių sutapimo He II rezonansinės (pirmosios serijos pirmosios) rekombinacinės

emisijos linijos 30,378 nm fotonai O III joną sužadina į aukštą 2p 3d $^3P^0_2$ lygmenį. O kaskadiniai šuoliukai iš čia į žemesnius lygmenis pažeria šių O III emisijos linijų fotonus: 344,4 nm, 342,9 nm, 313,3 nm, 334,1 nm, 331,2 nm, 329,9 nm ir 37,444 nm. Pastarosios linijos fotonai iš ūko ištrūkti negali, nes ne tik jonizuoja H I ir He I atomus, bet ir sužadina N III jonus (vėlgi dėl atsitiktinio energijos lygmenų sutapimo). Sugėrę 37,444 nm fotonus, N III jonai spinduliuoja ne tik tokius pačius, bet ir 463,4–464,1 nm, 409,7–410,3 nm ir galiausiai mūsų nepasiekiančius 45,2 nm fotonus. Aišku, kad čia aptartuoju fluorescensiniu būdu susidarusios O III ir N III emisijos linijos aptinkamos tik tose ūkų (dažniausiai planetiškųjų) vietose, kuriose helis jonizuojamas du kartus.

6.2.4. Šiluminių smūgių sužadintas emisinių ūkų spinduliavimas

Atomus į aukštesnius energijos lygmenis pakelti ir emisijos linijas sukurti gali ir gretimų dalelių šiluminiai smūgiai. Šio proceso sėkmė labai priklauso nuo energijos lygmenų aukščio. Štai vandenilio ir helio antrasis ir aukštesnieji lygmenys yra labai aukštai (vandenilio 10,20 eV, helio net 19,77 eV), todėl emisiniuose ir planetiškuosiuose ūkuose šiluminiai smūgiai nepajėgia šių pačių gausiausių atomų sužadinti. Kitaip yra su tokiais atomais, kurių antrasis, o neretai ir trečiasis lygmuo yra pakankamai žemai ir kurie patys nėra tarpžvaigždinėje erdvėje itin reti ir negausūs. Šiuos atomus šiluminiai smūgiai sužadina labai gausiai, nes sužadinimo aktai į žemus lygmenis kartojasi kur kas dažniau už rekombinacijos aktus. Pagrindiniai sužadintojai yra laisvieji elektronai.

Žemi ir sužadinimui palankūs energijos lygmenys yra tokie, kuriuos sužadinant nesikeičia elektronų konfigūracija, taigi nė vienam elektronui nereikia peršokti į kitą debesėlių sluoksnį ar pasluoksnį. Keičiasi tik elektronų sąveika. *Visi tokie lygmenys yra metastabilūs.* Tokius lygmenis turi Ne V, F IV, O III, N II, C I, Ar V, Cl IV, S III, P II, Si I, Ne IV, F III, O II, N I, Ar IV, Cl III, Si II, P I, Ne III, F II, O I, Ar III, Cl II, S I ir dar kai kurie kiti atomai. Tiesa, tik maža dalis iš čia suminėtų atomų emisiniuose ūkuose yra pakankamai gausūs, kad galėtų sukurti stiprias *draustines* smūgių sužadintas linijas. Iš jų labiausiai pagarsėjo [O III] draustinės linijos. (Draustinių linijų atveju cheminio elemento simbolis rašomas laužtiniuose skliaustuose.)

Jau XIX a. septintajame dešimtmetyje ūkų spektruose astronomai pastebėjo porą labai stiprių, tačiau nepažįstamų žalių linijų ir ištisą pusę šimtmečio negalėjo suprasti, kokiam cheminiam elementui ji priklauso. Buvo net iškelta hipotezė, kad ūkuose švyti naujas, Žemėje dar nesurastas elementas – nebulis (lot. *nebula* – ūkas, debesis). Laikantis šio pavadinimo, linija 500,68 nm buvo pradėta žymėti N_1, o linija 495,89 – N_2. Pagaliau amerikiečių fizikas Aira Baue-

nas (*I. S. Bowen*) 1927 m. nustatė, kad jokio nebulio nėra, o ūkuose stebime draustines, Žemės laboratorijose dar nematytas [O III], [O II], [N II] ir kitokių atomų linijas. Pavyzdžiui, garsioji linija N_1 yra ne kas kita kaip draustinė nebulinė [O III] linija $2s^2 2p^2\ ^1D_2 \to 2s^2 2p^2\ ^3P_2$ 500,68 nm. Panašiai N_2 yra [O III] linija $2s^2 2p^2\ ^1D_2 \to 2s^2 2p^2\ ^3P_1$ 495,89 nm. Nuo to laiko visos šitokios draustinės linijos, sukurtos atomų šuolių iš pirmojo (paties žemiausiojo) metastabiliojo lygmens į pagrindinį, imtos vadinti ***nebulinėmis*** linijomis.

Panašiai draustinės linijos iš antrojo metastabiliojo lygmens į pirmąjį metastabilųjį lygmenį pradėtos vadinti ***aurorinėmis***. Dingstį šiam pavadinimui davė [O I] 557,7 nm linija, stipriai šviečianti polinėse pašvaistėse.

Draustinės linijos iš antrojo metastabiliojo lygmens tiesiai į pagrindinį kai kurių autorių vadinamos ***transaurorinėmis***. Pavyzdžiui – [O III] 232,1 ir 233,2 nm linijos.

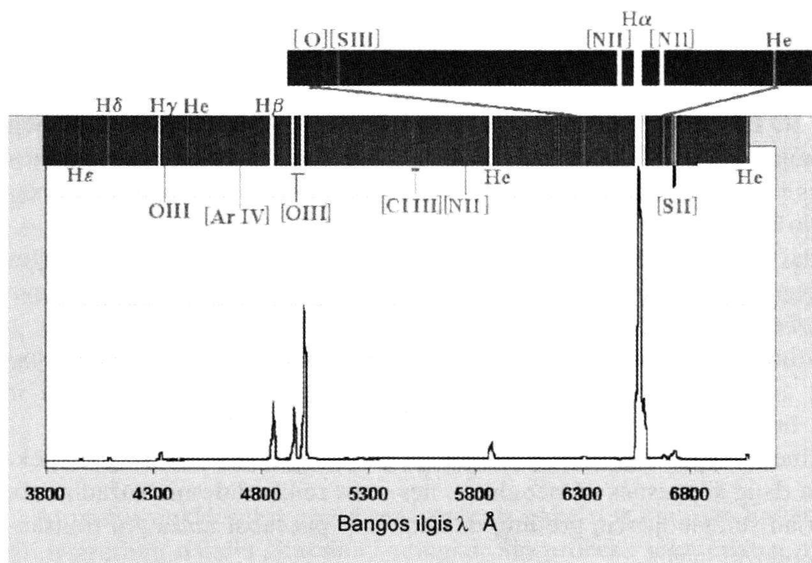
Aurorinės ir ypač transaurorinės linijos tarpžvaigždinės medžiagos spektruose yra daug silpnesnės už nebulines, nes joms reikia didesnio sužadinimo, taigi stipriau smūgiuojančių gretimų dalelių. Taip pat labai maža yra transaurorinių šuolių tikimybė.

Smūgių sužadintos linijos emisiniuose ir planetiškuosiuose ūkuose veikia kaip šaldytuvai, reguliuoja ūkų temperatūrą. Juk sužadindami atomus, laisvieji elektronai ir kitos dalelės praranda dalį savo šiluminės energijos, kuri paskui į ūką nebegrįžta, nes ją išneša sužadintųjų linijų fotonai. Kaip prisimename, savo šiluminę energiją laisvieji elektronai gavo jonizacijos metu iš ūkų švytėjimą sukeliančių žvaigždės L_s spindulių. Taigi jonizaciją sukeliantys žvaigždės fotonai ūką kaitina, o išspinduliuojamieji draustinių linijų fotonai – vėsina. Tarp abiejų reiškinių nusistovi pusiausvyra, skirtinguose ūkuose ir skirtingose to paties ūko vietose nustatanti šiek tiek skirtingą temperatūrą.

Arti pačių karščiausių žvaigždžių emisinius ir planetiškuosius ūkus labiausiai vėsina garsioji žalioji nebulinių emisijos linijų pora N_1 ir N_2. Kai kuriose ūko vietose arčiau jonizaciją sukėlusių žvaigždžių ši pora gali būti stipriausia iš visų emisijos linijų (išskyrus H_α 656,3 nm). Šitokiose ūkų vietose tarpusavyje



6.7 pav. *Didžiojo Oriono ūko (M 42, arba NGC 1976) spektro dalis. [O III] nebulinės linijos 500,7 nm ir 495,9 nm stipresnės už Hβ. Gerai matomas Balmerio kontinuumas H_S, už Balmerio serijos ribos 364,6 nm*



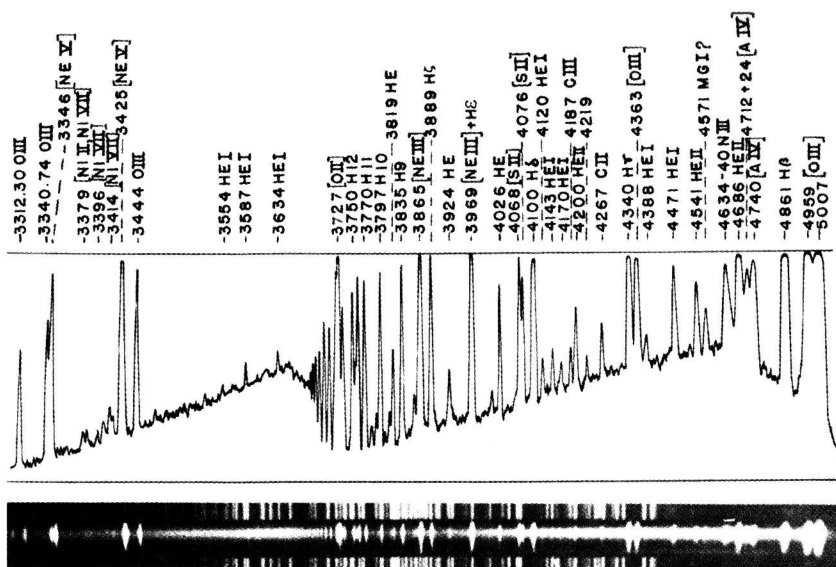
6.8 pav. *Dar viena M 42 spektro iliustracija. Apačioje registrograma leidžia palyginti svarbiausiųjų emisijos linijų stiprius*

rungiasi dvi spalvos – žalioji (N_1, N_2, Hβ 486,1 nm ir kitos daug silpnesnės emisijos linijos) ir raudonoji (Hα, [N II] 654,8 ir 658,4 nm, [S II] 671,7 ir 673,1 nm, He 667,8 nm ir kitos linijos).

O kitose ūko vietose, arčiau periferijos, toliau nuo ūko švytėjimą sukeliančių žvaigždžių, dauguma deguonies atomų jonizuoti tik vieną kartą. Dėl to N_1 ir N_2 linijos vidutinės arba silpnos. Čia klesti ultravioletinis nebulinis [O II] 372,60 nm ir 372,88 nm dubletas, vietomis savo stiprumu prilygstantis vandenilio linijoms. Tačiau ir šį dubletą, ir visas kitas emisijos linijas, net ir vandenilio linijas, čia nurungia infraraudonoji nebulinė [S III] 906,96 nm ir 953,21 nm pora. Tiesa, [O II] ir [S III] poros yra už regimosios spektro srities ribų. O regimojoje spektro srityje lieka viešpatauti Hα linija, daugumai ūkų (ypač emisinių) vietų suteikdama raudoną spalvą.

Kur deguonis jonizuotas du kartus, siera daugiausia jonizuota tris kartus, ir dėl to ten beveik nėra infraraudonųjų [S III] linijų, kurių bangų ilgiai didesni ir todėl sužadinimo energija mažesnė, jas sužadinti pajėgia ir lėtesni elektronai negu N_1 ir N_2 linijas. Dėl to infraraudonosios [S III] linijos ūką labiau atvėsina. N_1 ir N_2 žėrėjimo zonose temperatūra siekia 10 000 K, kartais ir 15 000 K. O ten, kur matomos infraraudonosios [S III] linijos, ji nukrinta iki 7000–8000 K.

Tiesa, ūko vėsimas taip pat labai priklauso ir nuo dujų tankio. Juk draustinių linijų stipris, taigi ir ūko energijos nuostoliai proporcingi sužadinimą sukeliančių laisvųjų elektronų koncentracijai (dalelių skaičiui cm^{-3}). Svarbu, kad



6.9 pav. *Planetiškojo ūko NGC 7027 spektro dalis. Registrograma parodo ne tik emisijos linijas, bet ir ištisinį spektrą, kuris silpnėja einant trumpesniųjų bangų pusėn, tačiau vėl pašoka ties Balmerio serijos riba 364,6 nm. Šį nelygumą šiek tiek mažina dvifotoniai šuoliai. Ši fotografinė nuotrauka, norint išryškinti silpniausias emisijos linijas, smarkiai perlaikyta. Todėl stipriausios emisijos linijos, ypač* N_1, N_2 *ir* $H\beta$ *neatrodo tokios stiprios, kokios yra iš tikrųjų. Maždaug nuo 460 nm, einant ilgesnių bangų pusėn, registrograma ima leisti žemyn dėl fotografinės plokštelės jautrumo mažėjimo*

būtų ir ką sužadinti. Vadinasi, draustinių linijų stipris taip pat proporcingas ir atitinkamų atomų (ar jonų) koncentracijai. O kiekviena iš šių koncentracijų savo ruožtu proporcinga visų ūko dujų koncentracijai n arba medžiagos tankiui ρ. Vadinasi, energijos nuostoliai, priklausantys nuo draustinių linijų stiprių, proporcingi n^2 (tiesa, tik iki tam tikros ribos, kol sužadinti į metastabiliuosius lygmenis atomai suspėja išspinduliuoti draustines linijas, nesulaukę naujų, spinduliavimui pražūtingų smūgių iš gretimų dalelių).

Taigi sieros ir deguonies atomai ūkuose yra nepaprastai aktyvūs spinduliuotojai. Gausieji H ir He atomai yra daug „tingesni“. Mat jie galimybę spinduliuoti gauna tik aplinkiniu keliu – reikia, kad pirma dar įvyktų jonizacijos ir rekombinacijos aktai.

Kitos nebulinės linijos emisiniuose ir planetiškuosiuose ūkuose yra silpnesnės. Iš jų minėtinos vieną ar keletą kartų jonizuotų azoto, anglies, silicio, neono, argono, aliuminio atomų linijos. Aurorinės, o ypač transaurorinės linijos daug silpnesnės už nebulines. Jos stebimos ne visuose ūkuose.

Šiluminę energiją iš ūko atima ir rekombinacijos aktai. Juk prarasdamas savo laisvę, elektronas naujai susidariusiam ištisinio spektro fotonui atiduoda ir savo turėtąją kinetinę energiją. Ūkus taip pat vėsina dujų dalelių smūgiai į

dulkeles. Kaip prisimename, surinkusios smūgių energiją dulkelės turi keliasdešimties K temperatūrą ir skleidžia nemažai šiluminės kilmės ištisinio spektro infraraudonųjų spindulių. Elektronų laisvieji šuoliai, sukuriantys daugiausia radijo bangas, irgi priklauso prie ūkų šaldytuvų.

Emisinių ūkų pavyzdžių yra **6.3**, **6.4**, **6.5**, **6.18**, **6.19**, **6.21**, **6.22**, **22s–26s** paveiksluose, taip pat antrajame, trečiajame ir ketvirtajame viršelio puslapiuose. Planetiškųjų ūkų pavyzdžių yra **14s–21s** paveiksluose. Galaktikų iliustracijose raudoni plėmeliai irgi yra emisiniai ūkai. Spalvotose iliustracijose kai kuriais atvejais kai kurios spalvos yra sąlyginės, pakeistos, pavyzdžiui, UV arba IR spinduliai transformuoti į regimąsias spalvas.

6.2.5. Emisinių ūkų dydis

Šviečiančių dujų srityse, kur yra pakankamai jonizaciją sukeliančių L_s kontinuumo fotonų ir kur jonizuotas beveik visas vandenilis, daug naujų jonizacijos aktų gali vykti tik tada, kai vandenilio branduoliai vėl rekombinuoja. Taigi naujų jonizacijos aktų skaičius praktiškai lygus rekombinacijos aktų skaičiui. O rekombinacija tuo greitesnė, kuo vienetiniame tūryje daugiau protonų ir laisvųjų elektronų. Taigi rekombinacijos, vadinasi, ir jonizacijos aktų skaičius vienetiniame tūryje proporcingas šių abiejų rūšių dalelių koncentracijų sandaugai $n_p n_e$. H II srityse praktiškai $n_p = n_e \approx 0{,}5n$ (čia n yra visų dujų dalelių koncentracija). Vadinasi, vienetiniame tūryje jonizacijos aktams sunaudotų L_s kontinuumo fotonų skaičius $\sim n^2$. Visoje H II srityje, jei jos spindulys yra r, šitokių fotonų skaičius

$$N \sim r^3 n^2. \tag{6.9}$$

Vienos žvaigždės skleidžiamų L_s fotonų skaičius priklauso tik nuo žvaigždės temperatūros ir šviesio. Aišku, kad jis visiškai nepriklauso nuo aplinkinės tarpžvaigždinės medžiagos tankio. Tuomet (**6.9**) sąryšyje N nepriklauso nuo n, todėl

$$r \sim n^{-\frac{2}{3}} \tag{6.10}$$

ir

$$M \sim n^{-1}. \tag{6.11}$$

Čia M – vienos žvaigždės jonizuotų dujų masė. Taigi kuo retesnė tarpžvaigždinė medžiaga, tuo didesnio tūrio sritį ir didesnį dujų kiekį pajėgia jonizuoti viena karšta žvaigždė. Proporcingumo koeficientai tuo didesni, kuo žvaigždė šviesesnė ir karštesnė. Jei tarpžvaigždinės medžiagos debesis yra didelio tankio, tai viena O spektrinės klasės žvaigždė pajėgia jonizuoti tik mažesnę tokio debesies dalį, kai tokia pat žvaigždė gali jonizuoti kelis gretimus mažo tankio debesis ir didžiulius tūrius tarp tų debesų. Pavyzdžiui, jei $n = 1$, jonizuoto tūrio spindulys siekia 30–100 pc. Jonizuoto vandenilio masė šiuo atveju sudaro

apie 30 000 Saulės masių, beveik 1000 kartų daugiau už pačios žvaigždės masę. O jei $n = 10^6$, tai r yra 10^4, o M net 10^6 kartų mažesni. Todėl daugelyje Galaktikos disko vietų dauguma difuzinių debesų aureolių priklauso H II sritims. O difuziniai, ypač molekuliniai debesys arba jų dalys, jonizuotos tik kur ne kur – arti O, B0, B1 spektrinių klasių žvaigždžių, kurių Galaktikoje yra labai mažai ir kurios, būdamos visiškai jaunos, buriasi tik ten, kur šiuo metu tebevyksta arba tik ką (t. y. prieš milijonus ar tik šimtus tūkstančių metų) vyko žvaigždėdara. Todėl neretai vieną emisinį ūką jonizuoja ištisa karštų žvaigždžių grupė. Tokiais atvejais emisinių ūkų skersmenys gali būti labai dideli. Pavyzdžiui, mūsų Galaktikos palydovėje – galaktikoje, kuri pavadinta Didžiuoju Magelano Debesiu (DMD), – esančioje už 52 kpc, yra per 300 pc skersmens emisinis ūkas Tarantulas (žr. **6.5**, **27s**, **37s**, **8.14** pav.). Dar didesnio skersmens (per 400 pc) emisinis ūkas NGC 604 yra Trikampio galaktikoje M33, arba NGC 598 (žr. **23s** pav.).

6.3. NEŠVYTINČIOS TARPŽVAIGŽDINĖS DUJOS ARBA H I SRITYS

Jonizuoti debesys arba jų dalys sudaro tik apie 5% visų Galaktikoje esančių tarpžvaigždinės medžiagos debesų turio. Taigi emisinių ūkų pavidalu mums pasirodo tik maža Galaktikos debesų dalelė. Pagrindinė difuzinių ir molekulinių debesų dalis skendi tamsoje. Tamsiuose difuziniuose debesyse didžioji dalis vandenilio ir beveik visas helis yra neutralių atomų pavidalo. Todėl tokie debesys dar vadinami ***H I sritimis***.

6.3.1. Dalinė jonizacija H I srityse

H I sritys nėra visiškai apsaugotos nuo jonizacijos. Į jas tik nepatenka trumpieji ultravioletiniai karštųjų žvaigždžių spinduliai, pajėgūs jonizuoti vandenilį ($\lambda < 91{,}15$ nm). (Jeigu jie patektų, visas vandenilis būtų jonizuotas, ir turėtume nebe H I, o H II sritį). Ilgesnieji įvairių žvaigždžių spinduliai nedideliais kiekiais į H I sritis patenka ir jonizuoja kai kur didesnę, kai kur mažesnę dalį tokių už vandenilį šiek tiek lengviau jonizuojamų atomų kaip C, Si, S, P. Metalus jonizuoti pajėgūs ir gerokai mažesnių energijų fotonai. Todėl H I srityse dauguma metalų atomų yra jonizuoti. Daugelyje vietų jonizuoti ir keli ar keliolika procentų vandenilio atomų. Tarpžvaigždinės retmės sąlygomis, kai labai retai susiduriama su gretimomis dujų dalelėmis, tarp jonizacijos ir rekombinacijos aktų praeina labai ilgas laiko tarpas (žr. (**6.4**) formulę). Todėl ten toks didelis jonizuotų atomų procentas. Kuo mažesnis H I srities tankis,

tuo vidutiniškai didesnis visų atomų procentas šioje srityje yra jonizuotas. Todėl laisvųjų elektronų skaičius čia mažai tepriklauso nuo tankio ir siekia 0,01–0,03 viename cm^3. Pagrindiniai H jonizuotojai yra kosminiai, ypač subkosminiai spinduliai (žr. **6.7** poskyrį).

H I srityse nedideliais kiekiais visokiausius atomus, tarp jų ir vandenilį su heliu turėtų jonizuoti ir Rentgeno spinduliai, kurių šiek tiek pasitaiko netgi pačiose nuošaliausiose Galaktikos vietose. Juos skleidžia karštos vainikinės dujos bei supernovų likučių ūkai, jais visame Galaktikos tūryje virsta dalis vadinamųjų reliktinių radijo fotonų, atvirkštinio Komptono reiškinio metu gavusių daug energijos iš kosminių spindulių. Atomus jonizuoja ir įvairiausios kilmės smūginės bangos, tai šen tai ten nusiritančios per tarpžvaigždinius debesis.

H I srityse dėl menkos jonizacijos labai reti rekombinacijos aktai. Todėl rekombinacinis švytėjimas, aprašytas **6.2.3** skirsnelyje, čia yra visiškai silpnas, praktiškai nesusekamas. Laisvųjų elektronų smūgiai taip pat beveik nepajėgia sužadinti emisijos linijų optiniams stebėjimams prieinamoje spektro dalyje. Tuo būdu H I sritys, išskyrus atspindžio ūkus, praktiškai nešvyti, o skendi tamsoje.

6.3.2. Energijos balansas ir H I sričių temperatūra

Kaip H II, taip ir H I srityse temperatūra kyla vykstant jonizacijos aktams, kurie teikia atplėšiamiesiems elektronams šiluminę energiją. Tačiau čia yra ir vienas esminis skirtumas. H II srityse jonizacijos aktų skaičius vienetiniame tūryje $\sim n^2$, nes ten nauji jonizacijos aktai gali vykti tik po rekombinacijos. Tuo tarpu H I srityse beveik visi atomai yra nejonizuoti. Vadinasi, naujiems jonizacijos aktams visiškai nereikia laukti rekombinacijos. Todėl jonizacijos aktų skaičius vienetiniame tūryje priklauso beveik vien tik nuo jonizatorių pajėgumo, mažai tepriklausydamas nuo n. Netgi gali būti atvirkščiai: į labai didelio tankio tamsius debesis sunkiau prasiskverbia jonizaciją sukeliantys fotonai ir kosminiai spinduliai.

O šaldymo mechanizmas čia iš esmės toks pat kaip ir H II srityse. Būtent tamsius H I debesis labiausiai šaldo laisvųjų elektronų šiluminių smūgių sužadintos draustinės emisijos linijos. Skirtumas tik tas, kad H I sričių pagrindinės draustinės linijos yra labai tolimoje infraraudonojoje srityje. Jos atsiranda vykstant atomų šuoliukams žemyn iš pagrindinio energijos lygmens aukštesniųjų komponentų. Šie komponentai yra labai žemai, vos šimtųjų ar tik tūkstantųjų eV dalių aukštyje.

Debesis taip pat šaldo dulkių skleidžiami šiluminiai ištisinio spektro spinduliai, kurių energijos maksimumas priklauso nuo temperatūros ir dažniausiai yra tolimoje infraraudonojoje srityje. Dujos savo kinetinę energiją atiduoda dulkelėms plastiškaisiais smūgiais.

Molekulinius debesis labiausiai šaldo molekulių infraraudonosios ir radijo

emisijos linijos, kurias sužadina molekulių, atomų, negausių jonų ir elektronų tarpusavio šiluminiai plastiškieji smūgiai.

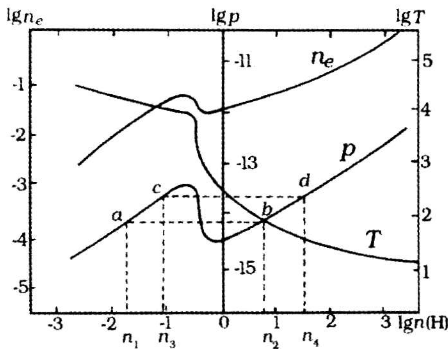
Dabar aišku, kad visais atvejais tarpžvaigždines dujas šaldo šiluminiai smūgiai, kurių dažnis $\sim n^2$. Taigi energijos nuostoliai irgi $\sim n^2$. Tačiau pats proporcingumo koeficientas yra labai nepastovus, smarkiai priklauso nuo dujų koncentracijos, cheminės sudėties, energijos tiekėjų ypatybių, jų pajėgumo ir kitų fizinių sąlygų. Smūgių gebėjimas efektyviai sužadinti atomus, jonus ar molekules labai priklauso nuo to, kas ir su kuo susiduria. Vienais atvejais efektyvesni bus laisvųjų elektronų smūgiai, kitais – H atomų, dar kitais – H_2 molekulių. Labai svarbu, kiek yra galinčių spinduliuoti tam tikros rūšies atomų, jų jonų, molekulių. Taip pat lemia energijos lygmenų schemų ypatybės, spinduliavimo šuolių tikimybės ir t. t. Todėl, apytiksliai imant, galioja taisyklė: kuo debesis tankesnis, tuo jis šaltesnis. (Juk energijos pajamos, kaip jau kalbėjome, mažai tepriklauso nuo n). O detali temperatūros kritimo eiga, didėjant koncentracijai, nėra lygi.

Atskirai vertėtų aptarti difuzinių debesų aureolių energijos balansą. Jei į tokią aureolę patenka karštų žvaigždžių skleidžiami L_S spinduliai ($\lambda \leq 91{,}15$ nm), tai ji tampa labai blausiai švytinčia visiškai mažo tankio, tačiau didelių matmenų 12–16 tūkstančių laipsnių karščio H II sritimi.

O jei L_S spinduliai iki debesų aureolių neprasiskverbia, tai dauguma vandenilio atomų lieka neutralūs. Tačiau daug yra ir H II atomų – nuo keleto iki 40%. Panašiai yra ir su kitais cheminiais elementais – debesų aureolėse jie jonizuoti labiau negu H I debesyse ir mažiau negu H II srityse. Jonizuodami debesų aureolių atomus, subkosminiai spinduliai turi stiprų sąjungininką – greta esančių vainikinių dujų Rentgeno ir UV spindulius. Tiesa, būdamos nepaprastai mažo tankio, vainikinės dujos spinduliuoja labai silpnai. Kitaip jų spinduliai dar labiau jonizuotų ir įkaitintų ne tik debesų aureoles, bet ir pačius debesis.

Iš dalies jonizuotos debesų aureolės dėl labai mažo tankio energijos išspinduliuoja visiškai nedaug, ir dėl to kinetinė temperatūra ten aukšta – siekia 8000–14 000 K. Taigi ji maždaug prilygsta H II sričių temperatūrai. O dauguma vandenilio atomų lieka neutralūs. Taip atsiranda galimybė šiluminiais smūgiais sužadinti vandenilio rezonansinę emisijos liniją Lα (121,57 nm). Ji ir tampa pagrindiniu šaldytuvu. Jai šiek tiek padeda [O I], [O II], [N I], [N II] ir kitų nejonizuotų arba menkiau negu H II srityse jonizuotų atomų nebulinės linijos.

Matome, kad Lα emisijos linijos fotonai reguliuoja iš dalies jonizuotų debesų aureolių temperatūrą. Dėl to temperatūra ten mažai tepriklauso nuo dujų koncentracijos. Juk vandenilio antrasis energijos lygmuo yra gana aukštai, jo energija net 10,15 eV arba $1{,}634 \cdot 10^{-18}$ J. Dujų temperatūrai krintant, H atomus į šį lygmenį sužadinti darosi vis sunkiau, tai padaryti gali vis mažesnė smūgių dalis. Todėl didėjant n, Lα linijos stipris auga lėtai. Vadinasi, T irgi krinta lėtai.



6.10 pav. *Tarpžvaigždinės medžiagos temperatūros T (kelvinais), paskaliais pateikto slėgio p = nkT ir laisvųjų elektronų koncentracijos* n_e *logaritminė priklausomybė nuo vandenilio atomų ir molekulių koncentracijos n(H), pasiekus pusiausvyrą tarp kaitinimo ir šaldymo reiškinių.* n_2 *ir* n_4 *yra vidutinė dujų koncentracija difuziniuose debesyse, atitinkamai esančiuose tarpuose tarp Galaktikos spiralinių vijų ir vijose,* n_1 *ir* n_3 *– tas pats debesų aureolėse. Šias koncentracijas atitinkantys taškai slėgio kreivėje pažymėti raidėmis b, d, a ir c*

Taip trunka, kol neprieinama tokių vietų, kuriose maždaug $T < 8000$–10 000 K ($n > 0{,}2$–$0{,}5$ atomo cm^{-3}). Ten dėl susilpnėjusios daugelio įvairių atomų jonizacijos labai pagausėja tokių atomų ir jonų, kurių energijos lygmenų schemose yra visiškai žemų, lengvai sužadinamų lygmenų ar pirmojo lygmens komponentų. Dėl to, toliau augant n, tarpžvaigždinių dujų temperatūra ima kristi labai greitai.

Energijos balanso teorinių skaičiavimų rezultatai pailiustruoti **6.10** pav. Kaip matome iš **6.10** pav., temperatūra, staiga kritusi maždaug 10 000–500 K intervale, toliau didėjant n, vėl pradeda mažėti vis lėčiau ir lėčiau. Mat šiluminiai smūgiai iš pradžių pradeda nebepajėgti sužadinti artimųjų infraraudonųjų emisijos linijų, vėliau vidutiniųjų, o galiausiai nelengvai besužadina ir tolimąsias IR linijas. Pagrindiniais šaldytuvais lieka radijo bangos. Ir iš viso, artėjant prie absoliutaus nulio, darosi vis sunkiau bet kokią medžiagą dar labiau atšaldyti.

Kaip rodo **6.10** pav., labai nelygi, iš trijų dalių susidedanti temperatūros kritimo eiga sąlygoja labai savotišką ir tarpžvaigždinei medžiagai lemtingą trigubą slėgio p priklausomybę nuo n. Juk $p = nkT$. Pradžioje p didėja, paskui gana greitai krinta ir pagaliau vėl palaipsniui ima didėti.

Ši triguba p priklausomybė nuo n kaip tik ir priverčia nejonizuotą ir iš dalies jonizuotą tarpžvaigždinę medžiagą pasiskirstyti į šaltus, 60–120 K temperatūros difuzinius debesis ir labai praretėjusias 8000–14 000 K karščio jų aureoles. Tarpžvaigždinės medžiagos sritys, kurioms būdingos tarpinės n arba T reikšmės, negali būti stabilios. Bespinduliuodamos jos ataušta, jų slėgis dėl to pasidaro mažesnis negu aplinkoje. Aplinkinė medžiaga tokias vietas suslegia. Dėl to jų temperatūra dar labiau krinta, jos suslegiamos vis daugiau ir daugiau. Taip tęsiasi tol, kol tokios nestabilios vietos pagaliau virsta normaliais šaltais difuziniais debesimis (žr. **6.6.1** skirsnelį.)

6.3.3. Vandenilio 21 cm radijo linija

Vandenilio atome elektrono ir protono sukiniai visuomet esti arba vienas kitam lygiagretūs, arba antilygiagretūs. Vadinasi, visi vandenilio atomo energijos lygmenų komponentai yra suskilę į labai artimus du supersmulkiosios struktūros sandus. Mažiausiai susiglaudę yra pagrindinio lygmens 1s $^2S_{1/2}$ sandai. (Šis lygmuo neturi smulkiosios struktūros komponentų). Tačiau ir šie sandai yra tokie glaudūs, kad šuolis iš viršutiniojo į apatinį sukuria visai mažos energijos vos 1420,40752 MHz dažnio arba 21,12 cm bangos ilgio radijo fotoną. Taigi tokie šuoliai, jei jie vyksta masiškai, turi skleisti 21 cm bangos ilgio radijo emisijos linijos fotonus.

Viršutinis supersmulkiosios struktūros sandas yra nepaprastai metastabilus. Iš jo galima nusileisti žemyn tiktai antrosios rūšies smūgio metu arba atliekant magnetinio dipolinio spinduliavimo aktą. Šis aktas kaip tiktai ir sukuria 21 cm bangos ilgio fotoną. Tačiau tai yra labai draustinis fotonas. Vandenilio atomas jį pagaliau išspinduliuoja išlaukęs viršutiniame, metastabiliajame sande vidutiniškai net 11 milijonų metų. Tai visai nenuostabu. Juk atomui šitaip spinduliuojant, elektronas turi „apsiversti“, jo sukinys iš lygiagretaus su protono sukiniu turi pasidaryti jam antilygiagretus. Todėl ir spinduliavimo tikimybė tokia maža.

Iš pirmo žvilgsnio gali atrodyti, kad šitokių fotonų turi būti labai mažai: per tokį ilgą laiką atomus iš viršutinio sando turi išmušti šiluminiai smūgiai. Tačiau reikalus pataiso tas faktas, kad viršutinis sandas pats dar yra trigubas, nes šiuo atveju viso atomo judesio kiekio momentas išoriniame magnetiniame arba elektriniame lauke gali užimti tris skirtingas padėtis. O apatinis sandas tėra viengubas. Dėl to Bolcmano pasiskirstymo formulėje viršutinio sando statistinis svoris $g = 3$, o apatinio $g = 1$. Jei abiejų sandų statistiniai svoriai būtų vienodi, viršutiniame sande būtų mažiau vandenilio atomų negu apatiniame. Tiesa, šis skirtumas būtų visiškai nedidelis, nes labai mažai tesiskiria energijų vertės. O štai viršutiniam sandui priskyrus $g = 3$, o apatiniam $g = 1$, paaiškėja, kad viršutiniame sande H I atomų visada yra beveik tris kartus daugiau negu apatiniame. Vadinasi, tarpžvaigždinių debesų platybėse kiekvienu momentu turi būti pakankamai ir tokių atomų, kurie spinduliuoja 21 cm fotonus.

Paaiškėjo, kad šią liniją skleidžia visi H I debesys. Nukreipus radioteleskopą į Paukščių Taką, praktiškai neįmanoma rasti dangaus lopinėlio, kuris neskleistų 21 cm linijos. Mat Galaktikos diske, o ypač spiralinėse vijose H I debesų labai daug, jie dangaus vaizde tiesiog susilieja vienas su kitu, užstodami vienas kitą. Tolimesnių debesų radijo bangos, kol pasiekia Žemę, turi pakeliui perskrosti daugybę artimesnių debesų. Juose 21 cm fotonai ne tik gaminami, bet ir sugeriami. Žūsta dalis tų fotonų, kurie savo kelyje aptinka

vandenilio atomus, esančius ne aukštesniame, o žemesniame pagrindinio lygmens supersmulkiosios struktūros sande.

Jei ne Doplerio reiškinys, 21 cm radijo fotonai iki mūsų prasiskverbtų maždaug tik iš tų Galaktikos disko debesų, kurie nėra toliau kaip keli tūkstančiai pc. O tai tik maža viso Galaktikos disko dalelė. Mus pasiekę fotonai irgi būtų mažiau naudingi, nes nesugebėtume atskirti, kurie iš jų radosi artimesniuose, o kurie tolimesniuose debesyse.

Laimei, Doplerio reiškinys daugeliu atvejų skirtingais mastais pakeičia skirtingo nuotolio debesų skleidžiamų fotonų bangos ilgį. Dėl to artimesni debesys pasidaro skaidrūs tolimesnių debesų fotonams, o patys fotonai nebesimaišo – juos galima išrūšiuoti pagal debesų nuotolį.

Didžiausią Doplerio reiškinį gali sukelti Galaktikos sukimosi ypatumai. Būtent tarpžvaigždinės medžiagos dalelės, kaip ir žvaigždės, skrieja apie Galaktikos centrą greičiu, kuris priklauso nuo atstumo iki centro. Dėl to kinta nuotoliai tarp skirtingose Galaktikos vietose atsidūrusių objektų. Šis reiškinys vadinamas ***diferenciniu Galaktikos sukimusi***. Dėl jo tolimesnieji H I debesys arba artėja prie artimesniųjų debesų ir Žemės, arba nuo jų tolsta. Pro artimesnįjį debesį pralekiantys tolimesniojo debesies fotonai pasidaro pakitusio elektromagnetinių virpesių dažnio. Tokių fotonų neįstengia sugerti pakeliui užtikti atomai.

Diferencinis Galaktikos sukimasis leidžia ne tik išskirti atskirų debesų grupių 21 cm fotonus, bet ir sužinoti tų grupių nuotolius nuo mūsų. Tuo būdu 21 cm radijo fotonai ne tik padeda nustatyti tarpžvaigždinės medžiagos fizines charakteristikas, bet ir tirti Galaktikos sandarą bei sukimąsi, tarpžvaigždinės medžiagos išsidėstymą Galaktikoje ir net kitose galaktikose. Ypač daug 21 cm radijo fotonai prisideda tiriant Galaktikos spiralinę struktūrą. 21 cm fotonams pakeliui pasitaikiusios dulkelės ir plazmos dalelės yra beveik skaidrios, o H I atomus praskaidrina diferencinis Galaktikos sukimasis.

Tačiau šis praskaidrinimas neapima viso Paukščių Tako. Galaktikos sukimasis nekeičia atstumo ir nesukelia Doplerio reiškinio tarp tų objektų, kurie yra vienas kito atžvilgiu Galaktikos centro ir anticentro kryptimi. Dėl to iš Galaktikos centro 21 cm fotonai mūsų nepasiekia – pakeliui esančių H I atomų optinis tankis 21 cm fotonams $\tau_{21} >> 1$ [$\tau = \ln (J_0/J)$; čia J yra stebimasis tiriamojo objekto spindesys, J_0 – tas pats spindesys, jei pakeliui erdvė būtų visiškai skaidri]. Beveik nepasiekia mūsų ir Galaktikos pakraščio fotonai iš anticentro krypties, nes jiems $\tau_{21} \approx 1$. Tuo būdu šios abi kryptys 21 cm radijo bangas mums siunčia beveik taip pat, kaip ir idealusis spinduolis (absoliučiai juodas kūnas). Visos kitos dangaus kryptys, žiūrint net pro visą Galaktikos storį iki pačių tolimiausių pakraščių, išlieka gana skaidrios ($\tau_{21} < 1$ arba net $\tau_{21} << 1$) ir dėl to elgiasi kaip apyskaidriai spinduoliai.

Tiesa, yra ir savotiškų išimčių. Būtent, vietomis pasitaiko ir tokio didelio tankio bei skersmens šaltų debesų, kad jie yra neskaidrūs net savo paties sklei-

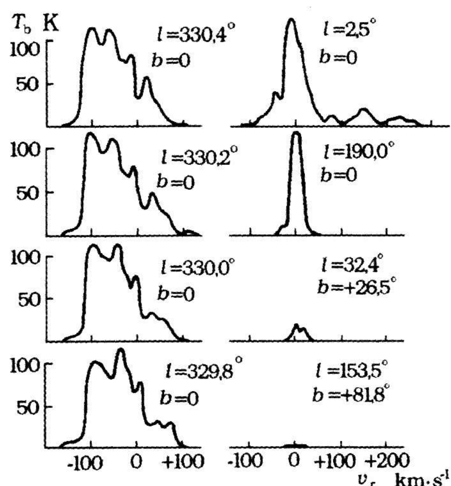
džiamiems 21 cm fotonams, ir šie fotonai mus pasiekia tik iš artimesniojo tokio debesies pakraščio.

Toks debesis juos mums siunčia kaip idealusis spinduolis. O tolimesniųjų debesų spinduliuojamiems 21 cm fotonams jis gali būti pakankamai skaidrus, jei šie fotonai yra dėl Doplerio reiškinio pakitusio dažnio.

Atstumai tarp atskirų tarpžvaigždinės medžiagos debesų kinta ne tik dėl diferencinio Galaktikos sukimosi, bet ir dėl debesų chaotiškų judesių, kurių greitis siekia 10–30 km/s. Tai irgi sukelia Doplerio reiškinį ir šiek tiek supainioja diferencinio Galaktikos sukimosi metodu nustatytus H I debesų grupių nuotolius.

Neramu ir debesų viduje. Ten sukasi dujų sūkuriai, teka atskiros srovės, vienos debesies vietos gali plėstis, kitos trauktis, vietomis gali nusiristi smūginės bangos. Šių judesių greičiai siekia dešimtis metrų, kilometrus, kartais keliolika kilometrų per sekundę. Daugumos vandenilio atomų šiluminiai greičiai šaltuose debesyse siekia iki 1 km/s. Nemažai yra ir daug greitesnių vandenilio atomų. Visi šie makro ir mikro judesiai debesų viduje taip pat sukelia Doplerio reiškinį.

Todėl net ir vieno debesies spinduliuojama 21 cm emisijos linija nėra be galo siaura, o užima ištisą 0,001–0,002 cm arba maždaug 100 kHz pločio spektro intervalėlį. Paprastai ties šio intervalėlio viduriu linija stiprėja, o pakraščiuose palaipsniui nusilpsta. Nusilpimo eiga nebūtinai simetriška į abi puses ir priklauso nuo fizinių sąlygų debesyse. Taigi vieno debesies spinduliuojama linija turi tam tikrą būdingą profilį. Kito, šiek tiek toliau arba arčiau esančio debesies linija jau truputį pasistūmusi, užima jau iš dalies kitą spektro intervalėlį. Tuo būdu skirtinguose nuotoliuose esančių debesų linijos, iš dalies užklodamos viena kitą, spektre užima ištisą plačią sudėtingo profilio emisijos juostą, paprastai turinčią daugybę įdubumų ir iškilimų. Atskirus iškilimus sukuria debesys arba debesų grupės.



6.11 pav. *Įvairių dangaus sričių 21 cm emisijos linijų profiliai. T_b – skaistinė temperetūra, v_r – radialinis greitis, l ir b – galaktinės koordinatės*

Tokių juostomis virtusių linijų pavyzdžių parodyta **6.11** pav. Šiuose grafikuose, kaip įprasta, Doplerio reiškinio sukelti dažnių pokyčiai $\nu_0 - \nu$ perskaičiuoti į radialinius greičius v_r. Ordinačių ašyse vietoje spindesio spektrinio tankio J_ν atidedama skaistinė temperatūra T_b, apskaičiuota remiantis (**6.7**) sąryšiu. Šitokiuose grafikuose

kreivė, rodanti spektrinės linijos monochromatinio stiprumo (pavyzdžiui, spindesio ar skaisčio spektrinio tankio, skaistinės temperatūros) priklausomybę nuo bangos ilgio arba dažnio (šiuo atveju radialinio greičio), vadinama ***spektrinės linijos profiliu***.

Jei H I debesis neskaidrus savo paties skleidžiamoms 21 cm radijo bangoms ($\tau_{21} = \infty$), šios linijos profilio atitinkamos viršūnės skaistinė temperatūra pasidaro lygi kinetinei temperatūrai T_k. Taip buvo išmatuotos pačių neskaidriausių H I debesų temperatūros. Galaktikos centro kryptimi taip pat $\tau_{21} >> 1$, todėl iš šios pusės ateinančių 21 cm bangų skaistinė temperatūra T_b = 130 K irgi lygi kinetinei temperatūrai. Tačiau šiuo atveju tai nėra vieno debesies temperatūra, nes negalime išskirti susimaišiusių daugelio persiklojančių debesų radijo bangų. Taigi čia gauname kažkokią vidutinę temperatūrą, kurios reikšmę padidina mažo tankio H I sritys. Atskirų didelio tankio debesų temperatūros maždaug dvigubai mažesnės. Beveik tokia pat vidutinė temperatūros vertė yra iš Galaktikos anticentro pusės ateinančių 21 cm bangų.

Apyskaidrių debesų (o tokių, kaip matėme, yra dauguma) temperatūra šiuo metodu lieka nenustatyta. Tai rodo (**6.8**) sąryšis. Tačiau pagal tą pačią (**6.8**) priklausomybę galima apskaičiuoti apyskaidrių debesų optinį tankį τ, o iš čia ir dujų koncentraciją atskiruose debesyse arba jų grupėse. Šiuo atveju kinetinę temperatūrą T_k tiriamiesiems debesims tenka priskirti iš analogijos su panašiais debesimis.

Stebima ne tik emisinė, bet ir sugertinė 21 cm linija. Šiuo atveju už H I debesies turi būti stiprus ištisinio spektro radijo šaltinis. Būtina, kad šio šaltinio skaistinė temperatūra, apskaičiuota iš (**6.7**) formulės, ties linija būtų aukštesnė už sugeriančio debesies kinetinę temperatūrą. Dauguma tokių šaltinių skleidžia kosminių spindulių elektronų sukurtas sinchrotroninės kilmės radijo bangas. Tai supernovų likučių ūkai, radijo galaktikos, kvazarai.

Jei tarp ištisinio radijo spektro šaltinio ir mūsų yra keli H I debesys, turintys skirtingus radialinius greičius, Doplerio reiškinys skirtingai pakeičia kiekvieno debesies sukurtos sugerties linijos vietą spektre. Taigi stebime kelias sugerties linijas. Jų profiliai leidžia apskaičiuoti atitinkamų debesų temperatūrą. Juk linija dėl Doplerio reiškinio tuo labiau išplitusi, kuo didesniais šiluminiais greičiais blaškosi atskiri debesies dujų atomai. Taip buvo nustatyta kelių šimtų artimiausiųjų H I debesų temperatūra.

6.3.4. Tarpžvaigždinių atomų sugerties linijos žvaigždžių spektruose

H I debesų atomai ir molekulės tolimesnių šaltinių ištisiniame spektre sukuria sugerties linijas ne tik radijo diapazone, bet ir kitose spektro srityse. Daugiausia žinių apie tarpžvaigždinę medžiagą teikia tarpžvaigždinės sugerties

linijos žvaigždžių spektrų artimojoje infraraudonojoje, regimosios šviesos ir ultravioletinėje srityse.

Šitokių tyrimų pradininkas 1904 m. buvo vokiečių astronomas Johanas Hartmanas (*J. F. Hartmann*). Kol teleskopai su spektrine aparatūra nebuvo iškelti viršum Žemės atmosferos, žvaigždžių spektruose pavyko rasti vos 23 tarpžvaigždinės sugerties linijas priklausančias Ca II, Ca I, Na I, K I, Fe I ir Ti II atomams. Kodėl taip mažai?

Atsakymas labai paprastas. Juk šaltoje tarpžvaigždinėje medžiagoje, kur labai reti ir silpni smūgiai iš gretimų dalelių, praktiškai visi atomai yra tik pagrindiniame, nesužadintame lygmenyje. Vadinasi, tarpžvaigždinėse dujose gali susidaryti tik tokios sugerties linijos, kurias sukuria atomų šuoliai aukštyn vien tik iš pagrindinio lygmens į sužadintus nemetastabiliuosius lygmenis. Tačiau visų pačių gausiausių tarpžvaigždinės medžiagos atomų ir jonų pats žemiausias sužadintas nemetastabilusis lygmuo yra taip aukštai, kad šuoliai į jį iš pagrindinio lygmens sukuria vien tik tolimas ultravioletines rezonansines sugerties linijas, kurių $\lambda < 300$ nm. O šios spektro srities nepraleidžia Žemės atmosfera. Pasitaiko ir dar ilgesnių šuolių ne į patį žemiausią nemetastabilųjį lygmenį. Tuomet sukuriamos dar trumpesnių bangų nerezonansinės sugerties linijos.

Taigi teleskopus su spektrografais būtina iškelti viršum Žemės atmosferos. Tai padarius, maždaug nuo 1969 m. žvaigždžių spektruose randamos naujos tarpžvaigždinės sugerties linijos pasipylė kaip iš gausybės rago.

Aišku, kad visų stipriausia yra vandenilio rezonansinė linija Lα (121,57 nm). Taip pat labai stipri ir Lβ (102,57 nm). Antras pagal gausumą elementas būtų helis. Tačiau jo rezonansinė linija (58,43 nm) yra už Laimano serijos ribos. O tokių spindulių iki Saulės sistemos nepraleidžia H I atomai.

Gana stipri rezonansinė 130,2 nm O I linija. Stiprios ir nerezonansinės O I tarpžvaigždinės sugerties linijos 103,9 nm bei 102,5 nm (susilieja su Lβ). Savo stiprumu pasižymi taip pat ir N I 120,0 nm, N I 113,5 nm, C II 133,5 ir 133,4 nm, C II 103,7 ir 103,6 nm ir dar daug kitų tarpžvaigždinės sugerties linijų.

Tolimų žvaigždžių spindulių kelyje pasitaiko ne tik H I, bet ir H II sričių, kur daug stipresnė dujų jonizacija. Tai atsispindi ir tarpžvaigždinės sugerties linijose.

Ypač tolimų žvaigždžių spektruose savo pėdsakus palieka ir labai karštos vainikinės dujos sukurdamos daug kartų jonizuotų atomų sugerties linijas. Išskirtinės yra O VI 103,76 bei 103,19 nm linijos. Analogiškos N V 124,28 ir 123,88 nm linijos yra daug silpnesnės.

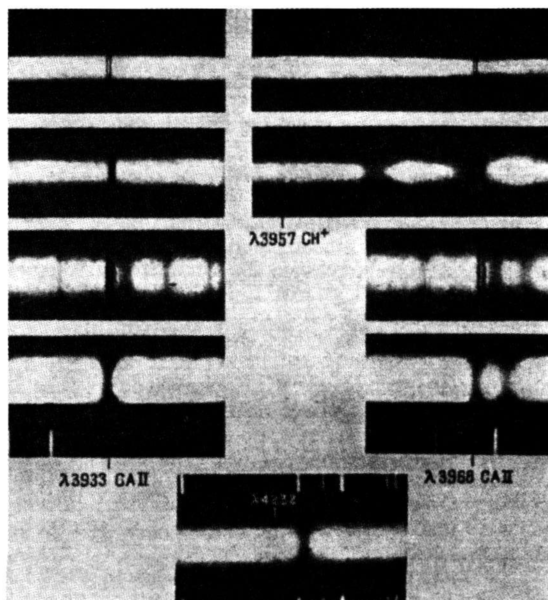
Kaip žvaigždžių spektruose matomas tarpžvaigždinės sugerties linijas atskirti nuo pačioje žvaigždėje susidariusių sugerties linijų? Lengviausia tai padaryti spektroskopinių dvinarių žvaigždžių atveju: dėl Doplerio reiškinio pačios žvaigždės linijos periodiškai keičia bangos ilgį, o tarpžvaigždinės linijos lieka pastovios. Doplerio reiškinys pagelbsti ir pavienių žvaigždžių atveju: tarpžvaigždinės linijos suskyla į tiek komponentų, kiek pakeliui tarp žvaigždės ir

mūsų yra skirtingai judančių debesų ar jų grupių. Tai leidžia dar vienu būdu tyrinėti tarpžvaigždinių debesų judėjimą. Komponentų skaičius kartais siekia dešimtį.

Atskiri komponentai nesusilieja dėl to, kad linijos yra siauros, ir tai būdinga daugumai tarpžvaigždinių sugerties linijų. Jų natūralus plotis paprastai esti labai mažas, nes labai siauras yra pagrindinis energijos lygmuo, iš kurio šuoliai aukštyn kaip tik ir sukuria praktiškai visas tarpžvaigždinės sugerties linijas. O šio lygmens siaurumą lemia tai, kad pagrindiniame lygmenyje atomai gali *išbūti neribotai ilgą laiką*.

Tarpžvaigždinės sugerties linijas dėl nepaprastai mažo sugeriančių dujų tankio mažai išplečia ir mikro Štarko efektas. Taigi linijas išplečia beveik vien tik Doplerio reiškinys, atsirandantis dėl sugeriančių atomų šiluminių judesių (mikro judesiai) ir dėl turbulencijos (visokių srovių ir sūkurių) debesų viduje (makro judesiai). Visų šių judesių greičiai šaltuose difuziniuose debesyse yra maži, todėl ir linijos siauros. Tik Lα dėl H I atomų gausumo yra daug platesnė.

H II srityse, o ypač vainikinėse dujose susidariusios sugerties linijos yra platesnės. Jos tuo platesnės, kuo aukštesnė dujų temperatūra ir greitesni turbulentiniai judesiai.



6.12 pav. *Tarpžvaigždinės Ca II sugerties linijos keturių labai karštų tolimų žvaigždžių (ζ Oph, P Cyg, ν Sgr ir α Cyg) spektruose. Pačiose žvaigždėse Ca II linijų nėra, nes ten visi Ca atomai jonizuoti du ir daugiau kartų. Dėl atskirų tarpžvaigždinių debesų skirtingų radialinių greičių tarpžvaigždinės linijos suskilusios į atskirus komponentus. Apačioje atskirai pavaizduota tarpžvaigždinės molekulės CH^+ sugerties linijos 423,2 nm aplinka žvaigždės ν Sgr spektre*

Tarpžvaigždines linijas lengviausia rasti, nesupainiojant jų su žvaigždinėmis linijomis, tokių žvaigždžių spektruose, kuriuose šių linijų neturėtų būti. Pavyzdžiui, O spektrinės klasės žvaigždžių spektruose negali būti H I, O I, C I, N I, Si I, P I, S I atomų sugerties linijų, nes šie atomai ten yra jonizuoti. Neutralių metalų atomų negali būti ne tik O, bet ir B spektrų klasių žvaigždėse. O štai tokie metalai, kaip Ca, Sc, Ti, Sr, Y, Zr, karštose O spektrinės klasės žvaigždėse yra jonizuoti du ir daugiau kartų. Todėl O žvaigždžių spektruose negali būti ir vieną kartą jonizuotų šių atomų sugerties linijų. Jeigu kurios nors žvaigždės spektre matosi tokios linijos, kurių ten neturėtų būti, darome išvadą, kad šios linijos susidarė pakeliui tarp žvaigždžių ir mūsų. Tarpžvaigždinės sugerties linijos labai daug pasitarnavo tiriant tarpžvaigždinės medžiagos judėjimą, cheminę sudėtį ir fizines sąlygas įvairiuose tarpžvaigždinės medžiagos objektuose.

6.4. DULKELĖS TARPŽVAIGŽDINIUOSE DEBESYSE

6.4.1. Atspindžio ir tamsieji ūkai. Tarpžvaigždinė ekstinkcija

Tarpžvaigždinių dulkelių buvimą visų pirma rodo ***atspindžio ūkai***, kuriuose šios dulkelės švyti atspindėdamos ir išsklaidydamos netoliese esančios pakankamai galingai spinduliuojančios žvaigždės šviesą.

Lyginant atspindžio ūką apšvietusios žvaigždės skleidžiamos energijos pasiskirstymo spektre kreivę su ūko dulkelių atspindėtos šviesos kreive, galima nustatyti, koks yra dulkelių atspindžio koeficientas (***albedas***), kaip jis priklauso nuo bangos ilgio. Tai vienas iš duomenų dulkelių prigimčiai pažinti.

Jei dulkelės sklaido praeinančią šviesą, tai pirmykšte kryptimi sklindanti šviesa turi palaipsniui silpnėti. Dalį šviesos dulkelės dargi sugeria. Praeidama pro vieną vidutinio tankio difuzinį debesį, šviesa susilpnėja apie 10–20%. Stambios debesų grupės arba atskiri didelio tankio molekuliniai debesys praeinančią šviesą susilpnina šimtus, tūkstančius, net milijonus kartų. Artimesnieji debesys tolimų Paukščių Tako žvaigždžių arba šviesių ūkų fone atrodo kaip tamsios dėmelės ir todėl vadinami ***tamsiaisiais ūkais***.

Stambiausia tokia dėmė matoma pietų pusrutulyje, Kryžiaus žvaigždyne. Jos regimasis skersmuo beveik dešimt kartų didesnis už regimąjį Mėnulio skersmenį. Europos jūrininkai ją pavadino „**Angliamaišiu**“. Nuo mūsų šis tamsusis molekulinis debesis yra už 175 pc. Jo ilgis 18 pc, plotis 15 pc, masė 4000 $M_\odot$. Jame viešpatauja 10 K šaltis. Praeinančią šviesą Angliamaišis susilpnina 10 kartų.

Kartais angliamaišiais vadinami ir kiti didesni tamsūs ūkai, matomi plikomis

akimis arba pro žiūronus. Tarp Gulbės ir Šaulio žvaigždynų jie susilieja į ištisą tamsią juostą, nusitęsusią Paukščių Tako viduriu. Dėl jų ir Paukščių Tako kraštai atrodo labai nelygūs, su iškyšuliais.

Pačios mažiausios ir neskaidriausios juodos dėmelės, matomos šviesių ūkų, o kartais ir Paukščių Tako fone, vadinamos ***globulėmis*** (lot. *globulus* – rutulėlis). Dažnai tai būna to paties šviečiančio ūko atskiros dalys, į kurias neprasiskverbia šviesa. Manoma, kad kai kurios paties didžiausio tankio globulės nesulaikomai traukiasi, ir dėl to jose galiausiai susidaro po vieną ar kelias žvaigždes.

Tolimi tamsūs debesys nebeišryškėja kaip tamsūs ūkai, nes šiapus jau yra daug žvaigždžių. Tačiau debesų daugybė tolimame perspektyviniame dangaus reginyje Paukščių Tako kryptimi susilieja į ištisą tamsios medžiagos klodą, nuo mūsų akių uždengiantį centrines Galaktikos sritis ir labai susilpninantį visų tolimų Paukščių Tako žvaigždžių spindesį. Iš Galaktikos branduolio aplinkos mus pasiekia tik infraraudonieji spinduliai ir radijo bangos. Kitų į mus briauna pasisukusių spiralinių galaktikų nuotraukose išilgai viso galaktikos disko matosi tamsus brūkšnys – susiliejęs tamsių debesų ir jų kompleksų miškas.

Toli nuo pagrindinės Galaktikos plokštumos debesų praktiškai nėra, o ten esančios labai retos vainikinės dujos dulkelių neturi. Todėl erdvė ten beveik visiškai skaidri, pro ją šviesa mus pasiekia iš tolimų galaktikų.

Pro tarpžvaigždinę medžiagą praeinančios tolimesnių spinduolių šviesos susilpnėjimo reiškinys vadinamas ***tarpžvaigždine ekstinkcija*** (lot. *extinctio* – gesinimas). Jos nepaveiktus žvaigždės spindesį ir ryškį pažymėkime J_0 ir m_0, o tos pačios žvaigždės realiai stebimus spindesį ir ryškį, paveiktus ekstinkcijos, pažymėkime J ir m. Šiems dydžiams pritaikę Pogsono formulę (**5.11**), gauname:

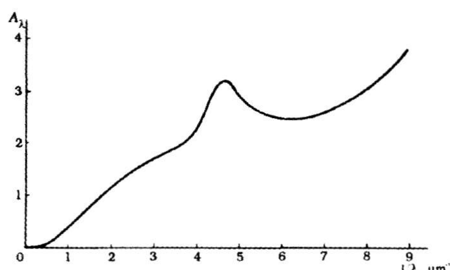
$$m - m_o = -2,5\lg\left(\frac{J}{J_o}\right) = A. \qquad \textbf{(6.12)}$$

Ekstinkcijos sukeltas ryškio prieaugis A vadinamas ***pilnąja ekstinkcija***. Šviesos kelyje esančių debesų optinį tankį $\tau = \ln(J_0/J)$ ir pilnąją ekstinkciją A sieja šis sąryšis:

$$A = 1,086\tau. \qquad \textbf{(6.13)}$$

Pilnosios ekstinkcijos dydis priklauso nuo praeinančių spindulių bangos ilgio. Tai iliustruoja vadinamoji ekstinkcijos kreivė. Labai stambiais bruožais, be smulkesnių detalių, ji pavaizduota **6.13** pav. Čia į akį krinta stipri ir plati sugerties juosta, nusidriekusi nuo 330 iki 160 nm. Jos viršūnė yra ties 218 nm. Kiti visiškai smulkūs lokaliniai ekstinkcijos padidėjimai 6.13 pav. nepažymėti. Jų esama per 40, pavyzdžiui, ties 18, 14–8, 3, 1 μm, 661, 630, 580, 443 nm. Tarpžvaigždinės ekstinkcijos kreivė nėra visiškai vienoda žiūrint visomis Paukščių Tako kryptimis. Atskiriems tarpžvaigždinių debesų kompleksams būdinga šiek

tiek kitokia kreivės eiga, kai kurios individualios detalės. Ypač dideli ekstinkcijos kreivės nevienodumai yra jos ultravioletinėje dalyje. Tai sukelia dulkelių rinkinių nevienodumai skirtinguose debesų kompleksuose.



6.13 pav. *Tarpžvaigždinės ekstinkcijos kreivė (žvaigždžių spindesio nusilpimo, apskaičiuoto žvaigždiniais ryškiais, priklausomybė nuo 1/λ)*

6.13 pav. matyti, kad tarpžvaigždinės dulkelės trumpesnių bangų spindulius silpnina vidutiniškai daug didesniu mastu negu ilgesnių bangų spindulius (išskyrus 218–160 nm diapazoną). Dėl to trumpesnių bangų spindulius įskaitantys ryškiai įgauna didesnius prieaugius arba pilnąsias ekstinkcijas. Pavyzdžiui, UBV sistemos ryškiai dėl ekstinkcijos pasikeičia šitaip:

$$U = U_0 + A_U, \quad B = B_0 + A_B, \quad V = V_0 + A_V \qquad (6.14)$$

ir ryškių prieaugiai arba pilnosios ekstinkcijos

$$A_U > A_B > A_B. \qquad (6.15)$$

Dėl (**6.15**) nelygybės atsiranda spalvos rodiklių prieaugiai:

$$\begin{aligned} U - B &= U_0 + A_U - (B_0 + A_B) = \\ &= U_0 - B_0 + (A_U - A_B) = (U - B)_0 + E_{U-B}. \end{aligned} \qquad (6.16)$$

Čia $(U-B)_0 = U_0 - B_0$ – ekstinkcijos nepaveiktas vadinamasis ***normalinis spalvos rodiklis***, $E_{U-B} = A_U - A_B$ – ***spalvos ekscesu*** vadinamas spalvos rodiklio priedas, atsiradęs dėl ekstinkcijos. Analogiškai

$$B - V = B_0 + A_B - (V_0 + A_V) = (B - V)_0 + E_{B-V}. \qquad (6.17)$$

Tai tinka ir visoms kitoms astrofotometrinėms sistemoms.

Taigi tarpžvaigždinė ekstinkcija ne tik susilpnina praeinančią šviesą, bet ir pakeičia jos spektrinę sudėtį, joje sumažina trumpųjų bangų spindulių dalį. Dėl to ekstinkcijos paveiktos žvaigždės atrodo ne tik silpnesnės, bet ir raudonesnės negu yra iš tikrųjų. Taip atsiranda ***tarpžvaigždinio parausvėjimo*** reiškinys. Jo matas yra spalvos ekscesas E, kuris proporcingas pilnajai ekstinkcijai A.

Matematiškai šis proporcingumas užrašomas šitaip:

$$A_\lambda = R \cdot E_{m_1 - m_2}. \qquad (6.18)$$

Dažniausiai naudojama

$$A_V = R \cdot E_{B-V} \qquad (6.19)$$

(UBV sistemoje). (**6.19**) sąryšyje proporcingumo koeficientas R šiek tiek priklauso nuo žvaigždžių spalvos. Jo vertė yra dažniausiai tarp 3,1 ir 4,0. Tačiau atskirose debesų grupėse gali būti vidutiniškai daug didesnio skersmens dulkelės negu visur kitur. Tuomet ir R vertės bus didesnės ir sieks iki 5 ar 6.

(**6.19**) sąryšis labai svarbus nustatant žvaigždžių absoliutinius ryškius M, jeigu žinomi jų nuotoliai r, arba nuotolius, jeigu žinomi absoliutiniai ryškiai. *UBV* sistemos atveju tam naudojama ši priklausomybė:

$$(V - A_V) - M_V = 5\lg r - 5, \qquad (\mathbf{6.20})$$

čia V yra iš stebėjimų gaunamas ekstinkcijos iškraipytas regimasis ryškis. Pilnoji ekstinkcija A_V apskaičiuojama iš (**6.19**) sąryšio.

6.4.2. Tarpžvaigždinė poliarizacija

Tolimų, smarkiai parausvėjusių žvaigždžių šviesa esti šiek tiek poliarizuota. Tai 1948 m. pastebėjo amerikiečių astronomai Viljamas Hiltneris (*W. A. Hiltner*) bei Džonas Holas (*J. S. Hall*) ir rusų astronomas Viktoras Dombrovskis. Vietomis poliarizacija siekia 10% ir daugiau. Vidutiniškai poliarizacija tuo stipresnė, kuo didesnė tarpžvaigždinė ekstinkcija. Poliarizacijos ir ekstinkcijos dydžių santykis priklauso nuo vietos Paukščių Take. Atskirų žvaigždžių šviesos elektrinių vektorių svyravimo kryptys labai įvairios, tačiau vyraujanti kryptis yra lygiagreti Galaktikos pusiaujui. Labiausiai ir tvarkingiausiai poliarizuota Cefėjo, Kasiopėjos, Persėjo žvaigždynų žvaigždžių šviesa. Mat jai reikėjo beveik statmenai perkirsti Galaktikos spiralinę viją. O Gulbės žvaigždyno žvaigždžių šviesa poliarizuota silpniausiai ir netvarkingiausiai. Ši šviesa daugiausia sklido išilgai spiralės vijos. Poliarizacijos stiprumas priklauso nuo bangos ilgio. Dažniausiai žalieji spinduliai poliarizuojami stipriausiai.

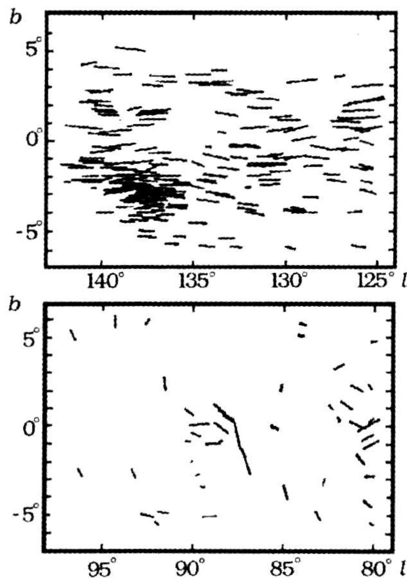
Poliarizaciją sukelia tarpžvaigždinės dulkelės, jei jų dauguma yra pailgos arba kiaušinių, adatėlių, diskų, plokščių snieguolių formos ir vienodai orientuotos. Juk sunku tikėtis, kad dulkelės visomis kryptimis išaugtų visiškai vienodo storumo. Susidurdamos su atomais ir molekulėmis, nesimetriškos dulkelės turi pradėti suktis apie savo trumpuosius skersmenis. Stambios dujų srovės, vienos krypties kosminių spindulių srautai, šviesos ir trumpesnių elektromagnetinių bangų slėgis, veikdami kartu su magnetiniais laukais, metalų priemaišų turinčias dulkeles gali taip orientuoti, kad jos imtų suktis apie magnetinio lauko linijas lyg kokie propeleriai. Dulkelėms šitaip sukantis, jų ilgieji skersmenys visą laiką lieka maždaug statmeni magnetinėms linijoms. Dėl to skersai magnetinių linijų sklindančiai tolimesnių žvaigždžių šviesai apvalios „atrodo“ tik tos dulkelės, kurios užkluptos tuo momentu, kuomet savo ilguosius skersmenis buvo pasukusios išilgai šviesos sklidimo krypties. Visos kitos pakeliui esančios dulkelės „atrodo“ daugiau ar mažiau pailgos ir savo ilguosius skersmenis išrikiavusios viena kryptimi – statmenai ir magnetinio lauko linijų krypčiai, ir šviesos sklidimo krypčiai. O šitokios dulkelės labiau išsklaido tuos spindulius, kurių elektrinio vektoriaus svyravimų kryptis sutampa su dulkelių ilgųjų skersmenų kryptimi. Vadinasi, mažiau susilpnėję, mažiau ekstinkcijos paveikti mus pasiekia tie spinduliai, kurių elektri-

nio vektoriaus svyravimų kryptis sutampa su magnetinio lauko kryptimi. Taigi registruojame tiesiai poliarizuotą žvaigždžių šviesą. O išilgai magnetinio lauko sklindanti šviesa lieka nepoliarizuota, nes pakeliui aptinka dulkeles, kurių ilgieji skersmenys dėl sukimosi orientuoti visomis galimomis magnetiniam laukui statmenomis kryptimis.

Vadinasi, magnetinės linijos yra nusidriekusios maždaug išilgai Galaktikos spiralinių vijų. Tarpuose tarp spiralių irgi tęsiasi magnetinis laukas. Jis čia daug silpnesnis ir labiau pakrikęs. Tačiau vyraujanti kryptis ta pati – lygiagreti pagrindinei Galaktikos plokštumai.

Chaotiški šiluminiai atomų ir molekulių smūgiai nuolat ardo dulkelių rikiuotę. O tvarkingi srautai ir magnetinis laukas vis bando ją atstatyti. Todėl šviesa tvarkingose gretose užklumpa tik dalį dulkelių. Užtat ir poliarizacija tik dalinė. Kiekviename debesyje ta dalis vis kitokia.

Iš dalies poliarizuota esti ne tik tolimų žvaigždžių, bet ir atspindžio ūkų šviesa. Šiuo atveju poliarizuoja ne tik pakeliui esančios, bet ir paties ūko dulkelės, atspindėdamos ir išsklaidydamos ūką apšvietusios žvaigždės spindulius.



6.14 *pav. Žvaigždžių šviesos poliarizacija dviejose Paukščių Tako srityse. Žvaigždžių šviesą poliarizuoja tarpžvaigždinės dulkelės. Atskiri brūkšneliai vaizduoja atskiras žvaigždes. Brūkšnelių kryptys rodo elektrinio lauko vektoriaus svyravimų kryptį, brūkšnelių ilgis – poliarizacijos laipsnį. Viršutiniame paveiksle yra dangaus sritis Kasiopėjoje (nelabai toli nuo Galaktikos anticentro). Šiuo atveju žvaigždžių spinduliai skrieja skersai spiralinių vijų. Apačioje – Gulbės žvaigždynas, kurio žvaigždžių spinduliai pas mus atskrieja išilgai spiralinės vijos. l ir b – galaktinės koordinatės*

Iš kai kurių žvaigždėdaros rajonų pro storus ir tankius, regimajai šviesai beveik neįveikiamus dulkelių šydus iki mūsų prasiveržusių IR spindulių sudėtyje paskutiniame XX a. penkmetyje pradėta aptikti ne tik tiesiai, bet ir elipsiškai ar apskritai poliarizuotų spindulių. Bandoma aiškinti, kad tai sąlygoja daugkartinę naujagimių žvaigždžių spindulių sklaidą jas gaubiančiose dulkelėse, pavyzdžiui, kokonuose, bipoliškuosiuose molekuliniuose srautuose, bipoliškuosiuose, kometiškuosiuose ir kitokiuose atspindžio ūkuose (žr. **6.3.3.3**, **6.19** pav., **6.20** pav.).

6.4.3. Tarpžvaigždinių dulkelių prigimtis ir kilmė

Žinant, kaip dulkelės veikia praeinančią šviesą, jau galima samprotauti apie pačių dulkelių fizines savybes ir cheminę sudėtį. Taip, pasitelkus fiziką, chemiją ir net mūsų žinias apie žvaigždžių evoliuciją, nuo 1946 m. (pirmieji bandymai maždaug nuo 1930 m.) kuriami teoriniai dulkelių modeliai, kurie padėtų paaiškinti visus stebėjimų duomenis – tarpžvaigždinės ekstinkcijos kreivių detales, albedo kreivę, žvaigždžių ir atspindžio ūkų šviesos bei IR spindulių poliarizacijos ypatybes ir pagaliau dulkelių būrimosi į debesis, jų gausumo, pasiskirstymo Galaktikoje bruožus.

Susidaro vaizdas, kad dauguma dulkelių pradeda formuotis išsipūtusių, jau trečiąjį evoliucijos etapą gyvenančių žvaigždžių (raudonųjų milžinių) vėsiuose išoriniuose apvalkaluose. Šviesos slėgio veikiami tokios žvaigždės išoriniai sluoksniai plečiasi ir vėsta. Kai dujų temperatūra nukrinta žemiau dulkelių lydimosi temperatūros, dujų molekulės pradeda sulipti į grupes, sudarydamos būsimų dulkelių (taigi kieto kūno gabalėlių) užuomazgas. Pradžioje tai vyksta labai lėtai. Tačiau tolyn nuo žvaigždės centro srūvančių dujų temperatūrai vis žemėjant, dulkelių užuomazgų augimo tempai didėja. Taip tęsiasi keliasdešimt metų. Kai pagaliau labai sumažėja vis toliau nuo žvaigždės centro atsiduriančių dujų tankis, dulkelės nustoja augti.

Jei tokioje žvaigždėje anglies atomų yra daugiau negu deguonies atomų, jos išoriniuose sluoksniuose visi deguonies atomai susijungia į molekules (daugiausia CO), o dalis anglies atomų lieka laisvi. Iš jų formuojasi grafito dulkelės. O jei žvaigždėje daugiau deguonies atomų, tai jų užtenka ne tik junginiams su anglies atomais, bet ir junginiams su silicio bei metalų atomais. O iš silicio ir metalų oksidų formuojasi silikatinės dulkelės. (Nors H atomų labai gausu, OH ir H_2O molekulių nesusidaro tiek daug, kad nebeliktų deguonies atomų silicio ir metalų oksidams.)

Žvaigždės šviesos slėgis ir jos išoriniuose sluoksniuose susidarinėjančios smūginės bangos naująsias dulkeles išmeta į tarpžvaigždinę erdvę. Grafitinės dulkelės suspėja išaugti vos iki 0,01–0,02 μm. O silikatinės dulkelės į tarpžvaigždinę erdvę patenka būdamos dar mažesnės – vidutiniškai vos 0,005–0,02 μm skersmens.

Tokios pat dulkelės, tik daug mažesniais kiekiais, susidaro novų ir supernovų sprogimų sukurtuose išsisklaidančiuose apvalkaluose, planetiškuosiuose ūkuose, prožvaigždėse, Volfo ir Rajė žvaigždžių apvalkaluose.

Dalis visų šių dulkelių patenka į difuzinius ir molekulinius debesis, kur jas ima bombarduoti ten esantys atomai ir molekulės. Dažniausiai įvyksta tamprieji smūgiai, kurių metu smogusi dujų dalelė nepraranda savo turėtos kinetinės energijos. Tačiau pakanka ir plastiškųjų smūgių, kurie atomo ar molekulės kinetinę energiją ar bent jos dalį paverčia daugiausia dulkelės šilu-

mine energija. Jei dulkelės temperatūra dėl to pernelyg nepakyla, smogusiai dujų dalelei gali nebeužtekti kinetinės energijos vėl atšokti nuo dulkelės. Dujų dalelė lieka pritraukta dulkelės paviršinių jėgų. Taip vyksta dujų ***adsorbcija*** prie dulkelių. Adsorbuotos dujų dalelės, dulkelės molekulių šiluminių smūgių skatinamos, klajoja po visą dulkelės paviršių. Dulkelė joms tampa mažu savo pasaulėliu. Čia jos susiduria su kitais adsorbuotais atomais ar molekulėmis. Dalis tokių susidūrimų baigiasi įvairiomis cheminėmis reakcijomis.

Daugelis cheminių reakcijų išskiria nemažai energijos, kurią reikia kažkam atiduoti. Susidarant vienai molekulei, visa išsiskyrusi cheminė energija gali virsti šios molekulės – naujagimės kinetine energija. Tuomet ši molekulė gali atitrūkti nuo dulkelės ir tapti laisva. Tačiau būna ir kitaip – cheminė energija virsta visos dulkelės šilumine energija. Tuomet naujoji molekulė lieka dulkelės paviršiuje.

Kai kurios molekulės, susidariusios dulkelių paviršiuose, ima kondensuotis į vandens (H_2O), metano (CH_4), amoniako (NH_3), formaldehido (H_2CO), anglies monoksido (CO) ir kitokius ledus, kuriais dulkelės vis labiau ir labiau apšąla. Taip susidaro ir palaipsniui išauga ištisinis ledinis apvalkalas – ***mantija***. O buvusi plika dulkelė tampa ***branduoliuku*** mantijos viduryje. Mantijoje dar gali būti metalų ir jų oksidų, taip pat sušalusių CO_2, NCO, N_2 ir kitokių dujų priemaišų.

Žvaigždžių spinduliai ir dulkelių susidūrimai skaldo ledų apvalkalo molekules, o jų „skeveldros" vėl jungiasi į įvairesnius ir dažniausiai sudėtingesnius, galiausiai net organinius junginius. Taip ledinis apvalkalas ilgainiui pavirsta pusėtinai tvirtu ir patvariu organinių junginių apvalkalu, aplink kurį vėl ima formuotis naujas įvairių ledų apvalkalas. Jei tokia dulkelė atsiduria molekulinio debesies gilumoje, kur beveik nebepatenka žvaigždžių spinduliai, šis antrasis, palaipsniui storėjantis apvalkalas išlieka ledinis. Mažytis branduoliukas pasidaro apgaubtas daug didesnės dvisluoksnės mantijos, kurią dar dengia prie paviršiaus prilipę (adsorbuoti) H atomai, kurie čia jungiasi į H_2 molekules. Žinoma, abu mantijos sluoksniai esti tarpusavyje daugiau ar mažiau susipainioję ir nevienalyčiai, sudaryti iš atskirų gabalėlių, kuriuose vyrauja skirtingos molekulės. Tuo būdu dulkelės per dešimtis milijonų metų išauga iki 0,1–0,5 μm, pasidaro pailgos.

Augant mantijoms, cheminių ir fizikinių procesų įvairovę didina elektriniai krūviai dulkelių paviršiuose. Juk dulkelės dažnai esti įelektrintos. Jų paviršiuose gali būti ir elektronų perteklius, ir trūkumas. Perteklių sukuria ten patekę elektronai iš aplinkinių dujų, trūkumą – fotojonizacija.

Labai šaltuose molekulinių debesų sutankėjimuose dulkelės gali susidurti ne tik dideliais, bet ir visiškai mažais greičiais ir dėl to nesusidaužyti, nesuardyti savo mantijų, kaip neretai atsitinka, o sulipti. Taip atsiranda ir dar stambesnių (0,5–1 μm) labai nevienalyčių fraktalinės struktūros ir sudėtingos

formos mikroskopinių grumstelių su visokiais atsišakojimais ir vidinėmis tuštumomis, su keliais ir silikatiniais, ir grafitiniais branduoliukais, su susipainiojusių organinių ir ledinių sluoksnių mantijomis. Kuomet žvaigždėdara suardo molekulinį debesį, dalis jo medžiagos, nepatekusi į naujagimes žvaigždes, išsisklaido po tarpžvaigždinę erdvę. Šiuo atveju sudėtingos fraktalinės struktūros dulkelės gali atsidurti ir gana toli nuo savo sulipimo vietų. Galimas daiktas, kad šitokios sudėtingos dulkelės sudaro dalį tos statybinės medžiagos, iš kurios formuojasi planetos ir kometos.

Kai kurie erdvėlaiviai, skriejantys toliau negu Marso orbita, specialiais įrengimais bando gaudyti tarplanetines dulkeles ir jas tirti. Tikimasi, kad tarp jų gali pasitaikyti ir tarpžvaigždinių dulkelių. Taip pat planuojama gaudyti ir tirti iš kometos branduolių į uodegas nublokštas dulkeles. Pavyzdžiui, 1999 m. vasario 7 d. startavo šiam tikslui specialus erdvėlaivis „Stardust“. Viena jo gaudyklė pagautas (kol kas visiškai negausias) dulkeles tiria čia pat orbitoje, o kita – pargabens į Žemę (grįžti turėtų 2006 m. sausio 15 d.). Jau gauta pranešimų, kad tyrimo metu suardytų dulkelių liekanos yra dervas primenantys polimerai. Dulkelių sudėtyje rasta molekulių, net 100 kartų masyvesnių už H_2O molekulę. Tačiau kol kas tai tik pirmieji bandymai tarpžvaigždines dulkeles tirti eksperimentiškai.

Žvaigždės išmeta į tarpžvaigždinę erdvę vis naujas ir naujas dulkeles. Molekuliniuose debesyse dulkelių mantijos vis auga ir auga. Aišku, kad turi būti ir priešingos krypties procesų, kurie dulkeles naikina ir ardo.

Visų pirma tai ***sublimacija*** – kietojo kūno, ypač ledų garavimas. Dulkeles taip pat po truputį arba iš karto ardo pernelyg stiprūs atomų ir molekulių smūgiai, trumpieji UV ir Rentgeno spinduliai, kosminiai ir subkosminiai spinduliai. Dulkelės gali suirti ir nuo per greito sukimosi apie savo trumpuosius skersmenis.

Patekusios į šaltus molekulinius debesis, ledų mantijomis dulkelės apauga palaipsniui, iš lėto. Todėl, kuo didesnė dulkelė, tuo tokių dulkelių esti mažiau. Dar nesuspėjusių mantijomis apaugti dulkelių yra tūkstančius kartų daugiau negu didžiausiųjų, užsiauginusių dviejų sluoksnių mantijas. O pačios mažiausios iš jų, mažesnės kaip 0,01 μm, net nepradeda mantijomis apaugti. Apskaičiuota, kad tokiam mažam gumulėliui išgarinti pakanka energijos, kurią išskiria jo paviršiuje susidaranti vienintelė molekulė.

Skirtingas ekstinkcijos kreivės (žr. **6.13** pav.) vietas formuoja skirtingo dydžio ir prigimties dulkelės. Infraraudonųjų ir regimosios šviesos spindulių ekstinkciją sukelia didžiausios iš jų, išaugusios iki 0,1–1 μm. Pastebimą ekstinkcijos padidėjimą ties 218 nm galėtų sukelti ledų mantijomis neapaugusios ir dėl to labai tamsios ir mažos 0,01–0,02 μm skersmens grafito dulkelės. Trumpiausius UV spindulius ypač smarkiai ima sklaidyti pačios mažiausios, tik 0,005–0,01 μm skersmens silikatinės dalelės. Jos ir lemia greitą ekstinkci-

jos didėjimą pačioje tolimiausioje UV srityje. Aptikta ir makromolekulių – policiklinių aromatinių angliavandenilių, sudarytų iš keliasdešimties C ir H atomų. Jų skersmenys siekia 0,001 μm.

Visiškai gali būti, kad esama ir vadinamosios ***neutraliosios ekstinkcijos***. Ji praeinančią šviesą tik silpnintų, bet nepakeistų jos spektrinės sudėties, nesukeltų tarpžvaigždinio parausvėjimo. Dėl pastarosios aplinkybės labai sunku aptikti tokią ekstinkciją. Todėl apie ją kol kas nieko tikro dar negalima pasakyti. Tokią ekstinkciją turėtų sukelti daug stambesnės, nebe mikroskopinės dulkelės ir dar didesni kietųjų kūnelių gabalai – meteoroidai ir kometos (žinoma, jeigu jų tarpžvaigždinėje erdvėje yra pakankamai daug). Stambios dalelės šviesą ne tiek išsklaido, kiek tiesiog užstoja.

Atrodo, kad dulkelės sudaro apie 1% visos tarpžvaigždinės medžiagos masės. Jos klajoja toli viena nuo kitos ir retai tesusiduria – nuotoliai tarp jų siekia decimetrus, metrus, kilometrus.

6.4.4. Dulkelių temperatūra ir spinduliavimas

Dulkelių temperatūra apskaičiuojama sudarant dulkelių gaunamos iš šalies ir jų išspinduliuojamos energijos balansą. Daugiausia energijos dulkelėms teikia žvaigždžių spinduliai. Mažesniais kiekiais šiluminės energijos dulkelės dar gauna iš dujų dalelių plastiškųjų smūgių ir iš dulkelės paviršiuje vykstančių cheminių reakcijų.

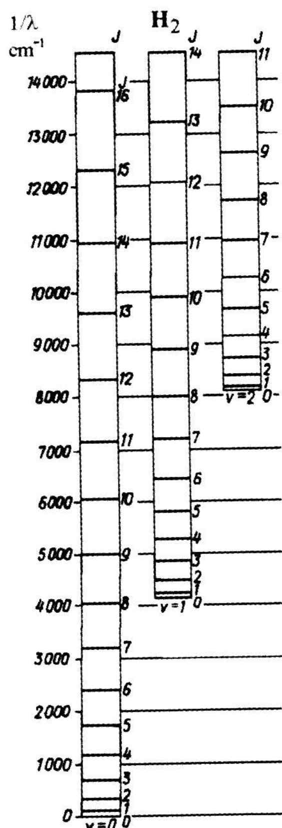
Grafitinės dulkelės aktyviau nei silikatinės sugeria UV ir regimosios šviesos spindulius. Dėl to jų temperatūra visada esti aukštesnė negu greta esančių silikatinių dulkelių. Pavyzdžiui, difuziniuose H I debesyse 5 kpc nuotolyje nuo Galaktikos centro grafitinių dulkelių temperatūra $T_C \approx 25$ K, silikatinių dulkelių – $T_{Si} \approx 13$ K, Saulės aplinkoje $T_C \approx 20$ K, $T_{Si} \approx 11$ K, 13 kpc nuotolyje nuo Galaktikos centro $T_C \approx 17$ K, $T_{Si} \approx 9$ K. Taigi kuo toliau nuo Galaktikos centro, tai yra kuo mažiau žvaigždžių spindulių, tuo dulkelės šaltesnės. Šaltuose molekuliniuose debesyse $T < 10$ K. Ir tik žvaigždėdaros srityse karštų ir galingų naujagimių žvaigždžių spinduliai, o neretai ir karštų jonizuotų dujų elektronų smūgiai sušildo dulkeles iki kelių dešimčių K.

Dulkelės, būdamos kieto kūno gabalėliai, spinduliuoja beveik taip pat, kaip atitinkamos temperatūros absoliučiai juodieji kūnai (idealieji spinduoliai). Taigi tarpžvaigždinės dulkelės skleidžia šiluminės kilmės IR spindulius ir submilimetrines bangas. Jų energijos pasiskirstymą pagal bangų ilgius nusako Planko dėsnis (**5.1**). Mūsų Galaktikos kaip ir kitų spiralinių galaktikų diskuose ne žvaigždės, o gausios dulkelės yra pagrindinis vidutinių ir tolimųjų IR spindulių šaltinis. Dulkelės sugeria 10–50% čia esančių žvaigždžių spindulių (daugiausia regimosios šviesos) energijos ir ją paverčia IR spindulių (ypač

tolimųjų) energija. Šių spindulių stebėjimas (žinoma, aparatūrą iškėlus virš Žemės atmosferos) labai padeda išryškinti molekulinių debesų (kur gausiausia dulkelių) pasiskirstymą Galaktikoje, jos spiralinę struktūrą.

6.5. MOLEKULĖS TARPŽVAIGŽDINIUOSE DEBESYSE

6.5.1. Kaip, kur ir kokios randamos molekulės?



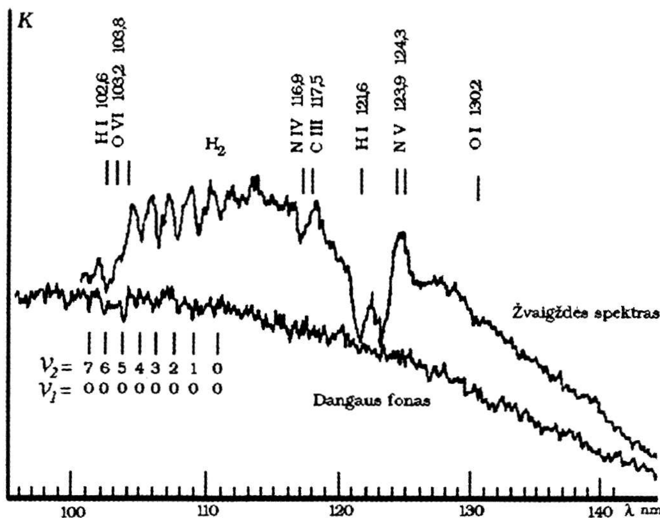
6.15 *pav. Vandenilio molekulės H_2 apatiniojo elektroninio energijos lygmens vibracinių ir rotacinių lygmenų dalis. Vibraciniai lygmenys pažymėti raidėmis v, rotaciniai – raidėmis J*

Difuziniuose debesyse dalis atomų, o molekuliniuose debesyse jų dauguma yra susijungę į molekules ir radikalus (nepilnas molekules). Astrofizikoje radikalai irgi vadinami molekulėmis. Juos taip vadinsime ir šioje knygoje.

Tarpžvaigždinės molekulės randamos stebint jų skleidžiamas radijo ir tolimąsias infraraudonąsias emisijos linijas arba jų sukuriamas sugerties linijas ir juostas tolimesnių spinduolių spektro įvairiose srityse. Plastiškieji šiluminiai smūgiai net ir labai šaltuose debesyse yra pajėgūs pakelti molekules į apatinio elektroninio ir apatinio vibracinio lygmens sužadintus rotacinius lygmenis arba lygmenų smulkiosios ir supersmulkiosios struktūros žemus sužadintus komponentus. O sužadintos molekulės energijos lygmenų grafikuose tuojau pat šoka žemyn pažerdamos emisijos linijas ilgabangėje infraraudonojoje, submilimetrinėje ir radijo srityse.

Vidutiniškai kuo didesnis dujų tankis ir kuo toliau nuo debesies krašto, tuo didesnė atomų dalis susijungusi į molekules. Difuziniuose debesyse viena molekulė randama tik tarp tūkstančių ar milijonų atomų. Molekuliniuose debesyse jos jau sudaro daugumą dujų dalelių. Jų skaičius viename cm^3 siekia šimtus ar tūktančius. O stambiausių debesų didžiausio tankio vietose, kur viename cm^3 telpa milijonai ar milijardai molekulių ir atomų, į molekules nesusijungę lieka vien tik helio bei kitų inertinių dujų atomai ir galbūt vienas kitas vandenilio atomų procentas.

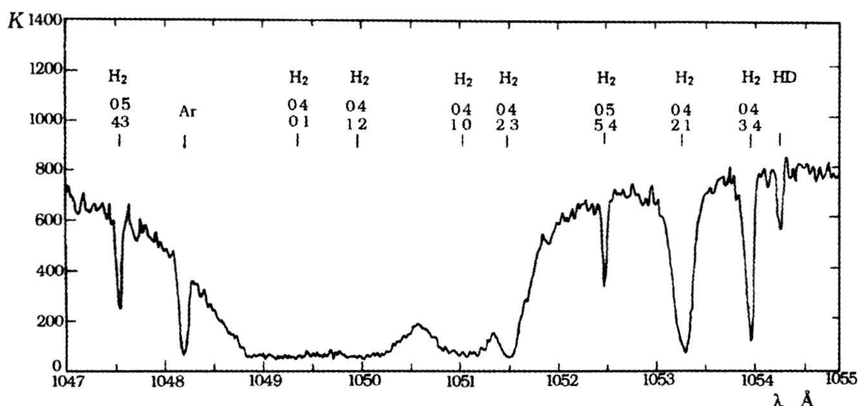
Šiuose sutankėjimuose esančios gausios dulkelės



6.16 pav. *O7 spektrinės klasės žvaigždės Persėjo ξ spektro tolimoji ultravioletinė dalis su tarpžvaigždinės sugerties linijomis ir juostomis. K – spektrofotometro parodymai, priklausantys nuo žvaigždės spindesio spektrinio tankio J_λ ir nuo stebėjimų aparatūros ypatybių. Brūkšneliai su cheminių elementų simboliais ir bangų ilgių vertėmis rodo tarpžvaigždinių atomų sukurtas sugerties linijas. Nepaprastai stipri yra tarpžvaigždinė Lα linija (121,6 nm). Gerai matosi ir Lβ (102,6 nm), susiliejanti su H_2 juosta. Karščiausiose vainikinių dujų vietose susidarė O VI linija, mažiau karštose – N V ir N IV linijos. Brūkšneliai su vibracinių lygmenų eilės numeriais v_1 ir v_2 rodo tarpžvaigždinių H_2 molekulių sugerties juostas. Iki sugerties visos H_2 molekulės buvo ne tik pačiame apatiniame (pirmajame) elektroniniame, bet ir pačiame apatiniame ($v = 0$) vibraciniame energijos lygmenyje. Čia jos užpildė nulinį bei pirmąjį, o daug mažesniais kiekiais ir dar kelis žemesnius rotacinius lygmenis. Sugerdamos praskriejančius žvaigždės UV fotonus, H_2 molekulės pakilo į antrojo nuo apačios elektroninio lygmens įvairius vibracinius lygmenis, kurių eilės numerius nurodo v_2 vertės. Didesnės dispersijos spektruose (žr.* **6.17** *pav.) galima įžiūrėti, kad kiekviena H_2 sugerties juosta susideda iš kelių sugerties linijų, iš kurių tamsiausias sukuria šuoliai iš nulinio ir pirmojo rotacinių lygmenų*

praeinančią šviesą susilpnina milijonus ar milijardus kartus. Todėl juose esančios molekulės negali žvaigždžių spektruose sukurti savų sugerties linijų, nes žvaigždžių šviesa į juos neprasibrauna. O radijo bangos pro dulkelių klodus laisvai praeina. Todėl molekulių skleidžiamas radijo emisijos linijų bangas registruojame sėkmingai.

Molekuliniai debesys – tai nuostabi Gamtos laboratorija, kuri leidžia fizikams tyrinėti, kaip elgiasi didžiuliai medžiagos kiekiai tokiame šaltyje, kokį Žemėje galima pasiekti tik nedideliuose specialiuose šaldytuvuose. Juk molekulinių debesų temperatūra vos 10–50 K. O molekulinių debesų sutankėjimuose dar šalčiau – tik 5–30 K. Taigi ten labai nejauku – visiškai tamsu ir baisiai šalta. Iš daugelio vietų nesimatytų net žvaigždėto dangaus – vien tik juoda tamsa.



6.17 pav. *O7 spektrinės klasės žvaigždės Gyvatnešio ζ trumpa spektro atkarpėlė ties H_2 molekulės sugerties juosta,* **6.16** *pav. pažymėta vertėmis $v_1 = 0$, $v_2 = 4$. Matome, kad ši juosta susidarė iš susiliejusių keturių rotacinių sugerties linijų. Dešimt vertikalių brūkšnelių rodo sugerties linijas, iš kurių aštuonios priklauso tarpžvaigždinėms H_2 molekulėms. Virš šių linijų surašyti vibracinių (aukščiau) ir rotacinių (žemiau) lygmenų eilės numeriai. Kairysis skaičius rodo būseną iki sugerties, dešinysis – po sugerties*

Molekulių jau rasta ir dešimtyse svetimų galaktikų. Jų radijo linijos rodo, kad ten irgi yra molekuliniai debesys, kuriuose fizinės sąlygos panašios kaip ir mūsiškiuose.

Nagrinėjant tarpžvaigždinių molekulių stebėjimų duomenis, nustatyta, kad vandenilis, kaip ir buvo tikėtasi, daugiausia susijungęs pats su savimi ir sudaro dviatomes H_2 molekules. Žinoma, jo užtenka ir kitoms molekulėms. Antroje vietoje pagal gausumą yra CO molekulės, bet jų net 15 000–20 000 kartų mažiau negu H_2 molekulių. Kitų molekulių dar šimtus ar net milijonus kartų mažiau. Anglies atomai taip pat labai linkę jungtis į įvairias organines molekules. Tai įvairūs aldehidai, alkoholiai, eteriai, karboninės rūgštys, amino rūgštys. Daugelis šių junginių, pavyzdžiui, ciano vandenilis HCN, metaniminas CH_2NH, metilaminas CH_3NH_2 ir kiti, Žemės labortorijose aktyviai dalyvauja cheminėse reakcijose, kuriose susidaro amino rūgštys ir kitos gyvybei labai svarbios molekulės. Tai rodo, kad Visatoje Gamta daug kur yra paruošusi medžiagų, reikalingų užsimegzti gyvybei, panašiai į žemiškąją. Reikia tik tinkamų sąlygų.

Žemės laboratorijose specialius neorganinių junginių mišinius veikiant ultravioletiniais arba Rentgeno spinduliais, elektros išlydžiais ir smūginėmis bangomis, irgi gaunami panašūs organinių molekulių mišiniai. Kai kuriuose ant Žemės nukritusiuose meteorituose taip pat randama nemažai sudėtingų organinių molekulių. Atrodo, kad jų esama ir kometose. Visi šitie faktai labai svarbūs sprendžiant baltymų susidarymo ir gyvybės kilmės problemą.

6.5.2. Kaip susidaro tarpžvaigždinės molekulės?

Labai įdomu, kaip tarpžvaigždinėje retmėje molekulės susidaro ir kodėl kai kurios iš jų tokios sudėtingos. Sutelkę jėgas, šį klausimą sprendžia daugelio šalių fizikai ir chemikai. Jie kuria teorinius modelius, kuriuose atsižvelgiama į visas naujausias žinias apie kosmines molekules ir fizines sąlygas jų aplinkoje. Taip pat bandoma atlikti ir kai kuriuos specialius eksperimentus laboratorijose.

Daug tarpžvaigždinės chemijos paslapčių dar neatskleista, daug cheminių procesų detalių dar neištirta. Tačiau jau nemažai ir sužinota, išaiškinta, suprasta. Galima teigti, kad naujos molekulės tarpžvaigždinėse dujose atsiranda trimis būdais: 1) susidaro dulkelių paviršiuose ir nuo jų atitrūksta, 2) susidaro pačiose dujose susiduriant atomams ir molekulėms ir 3) atlekia iš vėsesnių žvaigždžių atmosferų, kur dujų koncentracija daug didesnė.

Pirmąjį būdą jau aptarėme, kalbėdami apie tai, kaip auga dulkelių mantijos. Manoma, kad šitaip susidaro praktiškai visos H_2 molekulės. Retkarčiais prie dulkelės paviršiaus prilimpa ne vandenilio, o kitoks atomas. Tuomet vandenilio atomų apsuptyje gali susudaryti H_2O, NH_3, CH_4, SiH_4 ir daugelis kitokių vidutinio sudėtingumo molekulių, turinčių kelis vandenilio atomus. Kai kurios iš jų irgi gali ištrūkti ir papildyti dujų sudėtį.

Su dulkelėmis susiduria ne tik atomai, bet ir įvairios molekulės. Jei toks susidūrimas gana švelnus, mažo greičio, molekulė gali ir nesuirti, taip pat ir neatšokti nuo dulkelės, o prie jos prilipti, tapti adsorbuota. Dulkelės paviršiuje šitokia molekulė gali susijungti dar su vienu, o gal ir keliais ten sutiktais atomais ir pasidaryti sudėtingesnė. Jei cheminės reakcijos metu išskiriama energija, tai jos dalis gali būti panaudota molekulei atsiplėšti nuo dulkelės. Šitaip gali susidaryti ir gana sudėtingos organinės molekulės.

Chemines reakcijas dar paįvairina vietomis atsiradęs elektronų stygius arba jų perteklius, daugiausia sukeltas smūgių arba fotonų sugerties. Vykstant stipriems smūgiams arba trumpabangių fotonų sugerčiai, gali būti nuo dulkelių atplėštas visas būrys molekulių arba visai sutrupinta dulkelė. Tačiau taip atsitinka retai.

Antruoju būdu irgi susidaro daug įvairių molekulių, tarp jų - ir sudėtingų. Paprastai čia esti ištisos reakcijų grandinės, kurioms pradžią duoda, o dažnai ir vėliau aktyviai procese dalyvauja jau egzistuojančios labai gausios H_2 molekulės. Susidūrus elektriškai neutralioms dujų dalelėms (molekulėms ir atomams), cheminės reakcijos įvyksta labai retai. O kai susiduria neutrali dalelė su jonu, cheminės reakcijos esti tūkstančius kartų efektyvesnės.

6.5.3. Molekulinių debesų energijos balansas

Beveik visų cheminių reakcijų metu išsiskiria energija. Dažnai ji virsta reakcijos produktų kinetine energija. Susiduriant dalelėms, ši energija tampa aplinkos dujų šilumine energija. Taigi gaminantis molekulėms, trupučiuką šildomi tarpžvaigždiniai debesys. Žinoma, skaičiuojant molekulinių debesų energijos balansą, praktiškai pakanka atsižvelgti vien tik į šiluminį įnašą dėl H_2 molekulių gamybos. Visos kitos molekulės – tai tik menkutės priemaišos lyginant su vandenilio molekulių gausumu.

Susidarant vienai H_2 molekulei, iš viso išsiskiria 4,5 eV cheminės energijos. Iš jos tik 1 eV reikalingas naujagimei molekulei atplėšti nuo dulkelės paviršiaus. Likusios energijos tam tikra dalis gali atitekti dulkelei ir pavirsti jos šilumine energija. Kita likusios energijos dalis gali sužadinti naująją molekulę, ją pakelti į žemiausiojo arba ir antrojo nuo apačios vibracinio lygmens įvairius rotacinius lygmenis. Ir pagaliau dar viena išsiskyrusios cheminės energijos dalis virsta atplyštančios H_2 molekulės kinetine energija, taigi papildo aplinkinių dujų šiluminės energijos atsargas. Visas šis pasakojimas daugiau ar mažiau tinka ir kitoms molekulėms. Dalis kitų molekulių irgi susidaro jau būdamos sužadintos.

Kaip prisimename, difuzinius debesis daugiausia šildo subkosminių spindulių smūgiai bei nedideliais kiekiais užklystantys Rentgeno ir ilgesnių bangų fotonai. O molekuliniuose debesyse šie energijos šaltiniai, kaip matome, turi dar ir sąjungininką – chemines reakcijas.

Esant šildytuvams, turi būti ir tokio paties galingumo šaldytuvai. Kitaip debesies temperatūra turėtų keistis. Molekulinius debesis šaldo dulkelės ir molekulės, o mažesniu mastu ir kai kurie, pavyzdžiui, anglies, atomai arba jų jonai. Dulkelės tolimoje infraraudonojoje ir submilimetrinėje spektro srityje skleidžia silpną ištisinį spektrą, o molekulės – radijo, submilimetrines ir tolimąsias infraraudonąsias emisijos linijas. Visiems šiems fotonams sukurti eikvojama molekulinių debesų šiluminė energija.

Galėtume manyti, kad vandenilio molekulės dėl savo gausumo kaip tiktai ir sukuria daugumą šių fotonų. Aiškėja, – ne, nes tam nepalanki H_2 energijos lygmenų schema. Juk H_2 molekulės yra pačios lengviausios ir paprasčiausios. Todėl jų rotaciniai lygmenys nėra suskilę į tokius komponentus, tarp kurių įvykstantys šuoliai galėtų sukurti spektro linijas radijo diapazone. O tarpai tarp H_2 rotacinių lygmenų yra gana dideli (žr. **6.15** pav.). Vykstant šuoliams per tokius tarpus, sukuriamos vidutinio bangų ilgio infraraudonosios linijos. Pats žemiausias sužadintas rotacinis lygmuo, iš kurio peršokdamos žemyn H_2 molekulės galėtų spinduliuoti, yra palyginti aukštai. Šuoliai iš jo žemyn sukuria emisijos liniją, kurios $\lambda = 29\ \mu m$. Į tokį lygmenį šaltuose molekuliniuose debesyse vandenilio molekules gali sužadinti toli gražu ne visų gretimų da-

lelių smūgiai. Reikia, kad smogtų ir savo kinetinę energiją atiduotų tik išskirtinės, pačios greičiausios dalelės. Todėl šis lygmuo, tuo labiau kiti, dar aukštesni lygmenys daugelyje vietų mažai teužpildyti. Šiluminiai smūgiai sugeba į juos pakelti tik visiškai nedidelę dalį H_2 molekulių.

O ir atsidūrusios sužadintuose rotaciniuose lygmenyse, vandenilio molekulės neskuba spinduliuoti. Juk apatiniojo elektroninio lygmens visi vibraciniai ir rotaciniai lygmenys yra labai metastabilūs, nes iš jų žemyn negalimi elektriniai dipoliniai šuoliai. Tai būdinga ne tik H_2, bet ir kitoms simetriškoms molekulėms, kaip antai O_2, N_2 ir t. t. Kol elektroniniai energijos lygmenys tebėra nesužadinti, tokiose molekulėse teigiamų krūvių centras sutampa su neigiamu krūvių centru, taip pat ir su masių centru. Dėl to nesusidaro jokio dipolinio momento – jis lieka lygus nuliui nepriklausomai nuo molekulės vibracijos ir sukimosi. Vadinasi, tarp vibracinių ir rotacinių lygmenų negalimi dipoliniai šuoliai. O spinduliuoti kvadrupoliškai yra daug sunkiau. Šių šuolių tikimybės daug mažesnės. Ypač ilgai galimybės spinduliuoti kvadrupoliškai H_2 molekulės turi laukti, būdamos apatiniojo vibracinio lygmens sužadintuose rotaciniuose lygmenyse: aukštesniuose lygmenyse keletą mėnesių, o žemesniuose – keletą metų ar net daugiau kaip 1000 metų. Dažniausiai taip ilgai laukti neleidžia šiluminiai smūgiai atimdami iš vandenilio molekulių sužadinimo energiją ir jas be spinduliavimo permesdami į nesužadintą būseną.

Taigi vandenilio molekulės spinduliuoja labai silpnai. O ir šiam silpnam spinduliavimui energiją daugiausia ima ne iš šiluminių smūgių, o iš cheminių reakcijų. Kalbėjome, kad jos daugiausia susidaro jau būdamos sužadintos. Paskui energijos lygmenimis lyg kokiais laipteliais leidžiasi žemyn, spinduliuodamos visiškai silpnas draustines infraraudonąsias emisijos linijas. Taip tęsiasi iki pirmojo plastiškojo antrosios rūšies šiluminio smūgio, kuris atima sužadinimo energijos likučius.

Matome, kad vandenilio molekulės spinduliavimui beveik neeikvoja debesų šiluminės energijos ir negali būti jų šaldytuvai. Šias pareigas jos atlieka tik atskirose ne taip šaltose vietose, pavyzdžiui, naujų žvaigždžių formavimosi ar emisinių ūkų aplinkoje, debesų susidūrimų ar smūginių bangų sušildytose srityse.

Daugumoje molekulinių debesų vietų pagrindiniai šaldytuvai yra CO molekulės. Jos daug gausesnės už visas kitas molekules, išskyrus vandenilį, o jų energijos lygmenų schema labai palanki. Silpni šiluminiai smūgiai pajėgia sužadinti šias molekules į apatiniojo vibracinio lygmens pakankamai žemus rotacinius lygmenis, kurie nėra metastabilūs. Vykstant šuoliukams per gretimus lygmenis žemyn, pažeriama serija stiprių emisijos linijų, kurių bangų ilgiai yra 0,65, 0,87, 1,30 ir 2,64 mm. Paskutinioji linija, sukuriama šuoliuku iš pirmojo sužadintojo rotacinio lygmens į apatinį (rezonansinė rotacinė linija), yra pati stipriausia, taip pat ir patogiausia stebėjimų technikos požiūriu. Labai stipri bei patogi stebėti yra ir 1,30 mm linija.

Molekulės tarpžvaigždinėje medžiagoje ne tik susidarinėja, bet ir disocijuoja, suyra. Jas skaldo ultravioletiniai bei Rentgeno spinduliai ir labai stiprūs smūgiai, pavyzdžiui, sukelti subkosminių spindulių. Dažnai molekulė gauna daugiau energijos negu reikia jai suskilti. Energijos perteklius virsta skeveldrų (mažiau sudėtingų molekulių arba atskirų atomų) kinetine energija, kuri vėlesnių smūgių metu virsta debesies šilumine energija. Tai vienas iš debesų šildymo būdų.

Nereikia pamiršti, kad dalis tos energijos, kuri netampa molekulės skeveldrų kinetine energija, o yra sunaudojama molekulei suardyti, jos cheminiams ryšiams nugalėti, irgi ilgainiui virsta debesies šilumine energija. Juk suardydami molekules, trumpieji spinduliai arba greitosios dalelės sudaro galimybę naujoms molekulėms susidarinėti, vadinasi, išsilaisvinti cheminei energijai. Jei molekulės nebūtų skaldomos, tai ilgainiui nebeliktų laisvų, į molekules nesusijungusių atomų, ir naujų molekulių susidarymo procesas nutrūktų.

Molekules skaldančių spindulių daugiau pasitaiko debesų pakraščiuose. Todėl ten daug mažesnis molekulių procentas ir aukštesnė temperatūra, neretai didesnė nei 50 ar net 100 K.

6.5.4. Atomų izotopai molekulėse

Molekulių radijo linijos pasirodė esančios labai naudingos tarpžvaigždinės medžiagos izotopinei sudėčiai tyrinėti.

Tarpžvaigždinės medžiagos laisvų atomų (išskyrus vandenilio) izotopinės sudėties nustatyti negalima, nes praktiškai nesiskiria to paties atomo ar jono skirtingų izotopų spektrai. Kas kita, kai atomai susijungę į molekules. Molekulei suktis apie ašį arba vibruoti nėra tas pats, kai ji turi vienu neutronu daugiau arba mažiau. Dėl to molekulės vibracinių ir rotacinių lygmenų energijų vertės, vadinasi, ir atitinkamos spektro linijos pastebimai priklauso nuo to, kokie izotopai sudaro tą pačią molekulę. O radijo diapazone reikalai labai pagerėja dar ir dėl to, kad čia daug geriau negu optiniame diapazone galima išskirti labai artimas spektro linijas. Pavyzdžiui, molekulės $^{12}C^{16}O$ rezonansinės rotacinės linijos bangos ilgis $\lambda = 2{,}64$ mm, o molekulės $^{13}C^{16}O$ tokios pačios linijos $\lambda = 2{,}72$ mm.

Šias abi linijas radijo aparatūra ir pačių linijų siaurumas leistų išskirti net ir tada, jei jos būtų 2000–3000 kartų arčiau viena kitos.

Molekulių radijo linijų tyrimai parodė, kad to paties cheminio elemento skirtingų izotopų kiekių santykiai tarpžvaigždinėje medžiagoje praktiškai yra tokie patys kaip ir Saulės sistemoje. Vadinasi, Saulės sistema susidarė irgi iš tokios pat tarpžvaigždinės medžiagos.

6.6. KAIP SUSIDARĖ TARPŽVAIGŽDINIAI DEBESYS IR JŲ KOMPLEKSAI?

Kyla klausimas, kodėl tokia sudėtinga tarpžvaigždinės medžiagos struktūra. Kodėl, pavyzdžiui, tarpžvaigždinės dujos negalėtų būti visur vienodai pasiskirsčiusios, visur vienodo tankio?

Dėl to „kaltos“ ir žvaigždės, ir gravitacija, ir magnetinis laukas, ir pačių dujų šiluminio balanso ypatybės. Visos šios priežastys tarpusavyje labai persipynusios, veikia kompleksiškai. Tačiau pabandykime bent labai glaustai ir apytiksliai aprašyti kiekvieną jų atskirai.

6.6.1. Dujų šiluminio nestabilumo įtaka tarpžvaigždinės medžiagos struktūrai

Daugelis difuzinių debesų susidaro dėl energijos balanso ypatybių sukeltos savitos trireikšmės slėgio $p = nkT$ priklausomybės nuo dujų koncentracijos n. Tai iliustruojama **6.10** paveiksle, kurio duomenys apytiksliai apibūdina tas tarpžvaigždinės medžiagos sritis, į kurias nepatenka žvaigždžių L_s spinduliai. Taigi **6.10** pav. netinka vainikinių dujų ir H II sričių būsenai iliustruoti.

Pažiūrėkime, kaip šitokia trireikšmė slėgio priklausomybė nuo n sąlygoja difuzinių debesų susidarymą. Tarkime, kad kažkurioje tarpdebesinių dujų vietoje dėl kokių nors priežasčių padidėjo medžiagos tankis, atsirado sutankėjimas. Slėgis jame dėl to iš pradžių laikinai padidėja, sutankėjimas šiek tiek išsiplečia (tačiau visiškai nedaug – tiek, kad, jei lygintume su aplinka, vis tiek liktų sutankėjimas). O per tą laiką jame labai sparčiai krinta temperatūra sumažindama ir slėgį.

Atsirandant mūsų aptariamam sutankėjimui, jį vaizduojantis taškas **6.10** pav. pradžioje atsiduria viršum slėgio kreivės. Tačiau spartus temperatūros kritimas netrukus jį vėl grąžina į šią kreivę, tik, žinoma, į kitą vietą – labiau į dešinę negu buvo prieš atsirandant sutankėjimui. Reikia, kad ta naujoji vieta būtų dešinėje nuo slėgio kreivės užlinkimo, jos kritimo šakoje ir dargi žemiau pradinės slėgio vertės. Tuomet slėgis sutankėjimo vietoje pasidaro mažesnis negu aplinkoje. Aplinkinės dujos tą sutankėjimą suspaudžia. Temperatūra dėl to krinta, ir slėgis toliau mažėja. Sutankėjimas vis labiau atšąla, vis labiau suspaudžiamas, kol pagaliau jį vaizduojantis taškas atsiduria antrojoje slėgio kreivės kilimo šakoje. Sutankėjimas dar kurį laiką spaudžiamas toliau, kol galiausiai slėgis jo viduje susilygina su aplinkinių dujų slėgiu. Visas šis reiškinys vadinamas ***šiluminiu nestabilumu***. Sutankėjimą vaizduojantis taškas **6.10** pav. iš padėties *c* perbėga į padėtį *d*. O tai – tipiškų difuzinių debesų padėtis.

Iš karto darosi aišku, kad šitokiu būdu nauji debesys susidarinėja ne tarpuose



6.18 pav. *Emisinis Lagūnos ūkas, arba M8 ir spiečius NGC 6523 Šaulio žvaigždyne*

tarp Galaktikos spiralinių vijų, o pačiose vijose. Juk taškas *c* yra visai arti nestabilumo ribos, daug arčiau negu taškas *a*. Nedidelės tankio fliuktuacijos, sukeltos įvairiausių priežasčių, pavyzdžiui, žvaigždžių ar kitų debesų poveikio, tuoj pat atsiranda slėgio mažėjimo srityje ir virsta naujais debesimis.

Matome, kad tarpžvaigždinė medžiaga neišvengiamai suskyla į dvi fazes – karštas ir labai retas tarpdebesines dujas, kitaip sakant, difuzinių debesų aureoles, ir daugiau kaip šimtą kartų tankesnius ir šaltesnius difuzinius debesis. Slėgis abiejose fazėse vienodas. Trečioji fazė, kurioje slėgis maždaug toks pat, yra vainikinės dujos. Jos vėl šimtą kartų retesnės ir karštesnės negu debesų aureolės. Kaip prisimename, vainikinių dujų būklę sukuria supernovų sprogimai. Dar viena fazė yra H II sritys. Čia slėgis jau didesnis negu aplinkoje. Dėl to H II sritys plečiasi ir išsisklaido.

Ir dar viena fazė yra molekuliniai debesys. Slėgis juose irgi didesnis negu aplinkoje. Molekuliniuose debesyse dujų dalelių šiluminių judesių sukeltą slėgį $p = nkT$ nemažai papildo ***kinematinis slėgis*** (turbulentinių srovių ir sūkurių debesies viduje pastangos tą debesį išsklaidyti), taip pat magnetinio lauko slėgis bei debesies sukimasis apie savo ašį. Tačiau molekuliniai debesys nesiplečia, nes neleidžia medžiagos dalelių tarpusavio traukos (gravitacijos) jėga.

6.6.2. Debesų susidūrimai ir jų rezultatai

Tarpžvaigždinės medžiagos debesys susiduria kelių ar keliolikos km·s^{-1} greičiais. Dalis susidūrimų baigiasi susiliejimu. Tačiau neretai būna ir atvirkščiai – potvynio jėgos dar iš tolo ištempia ir ima draskyti mažesnio tankio debesį, išplėšia atskiras atplaišas, susidurdami debesys gali iškrikti, beveik išsisklaidyti. Susidūrimų rezultatai priklauso nuo daugelio faktorių – debesų masės ir tankio skirtumų, vidaus sandaros, susidūrimo greičio, pataikymo vienas į kitą tikslumo ir t. t. Debesų susiliejimui palankesnės sąlygos esti tuomet, kai mažesnių matmenų, tačiau didesnio tankio debesis įlenda į didesniojo, bet retesniojo vidų ir ten „įklimpsta". Nesimetriški smūgiai susidūrusius debesis priverčia pradėti suktis apie jų ašis.

Labai šaltuose debesyse garso greitis yra vos šimtai metrų per sekundę, karštuose – kilometrai per sekundę. Todėl debesys dažnai susiduria viršgarsiniais greičiais. O tai sukelia ***smūgines bangas.*** (Smūginė banga atsiranda visada, kai į dujas kas nors smogia viršgarsiniu greičiu, pavyzdžiui, kai skrenda greitas lėktuvas.) Pralėkdama smūginė banga staiga padidina dujų tankį ir temperatūrą.

Kaip prisimename (žr., pavyzdžiui, **6.3.2**), padidėjus tankiui, dujos ima daug stipriau spinduliuoti, šiluminės energijos balansas pasidaro neigiamas, dujos dėl to greitai atšąla, jų temperatūra pasidaro net žemesnė negu buvo prieš smūginę bangą. Padidėjęs tankis ir pažemėjusi temperatūra skatina molekulių sintezę dulkelių paviršiuje. Taip debesų susidūrimai ir jų sukeltos smūginės bangos kai kuriais atvejais difuzinius H I paverčia molekuliniais.

Ypač pagausėja ir sustiprėja smūginės bangos debesims „įkrentant" į galaktikų spiralines vijas. Tie debesys, kurių orbitų apie savosios galaktikos centrą spinduliai yra mažesni už ***korotacijos spindulį*** (žr. **7.13**), prisiveja spiralinę viją ir į ją įlekia iš vidinės pusės. O toliau esantys debesys savo greičiu jau nusileidžia spiralinei vijai, kuri juos ir paveja. Todėl į ją patenka iš išorinės pusės. Spiralinėse vijose yra potencinė duobė, nes ten stipresnis gravitacinis laukas. Įkrisdami į šią duobę, debesys įgyja papildomą keliolikos km·s^{-1} greitį ir trenkiasi į ten jau gausiai susibūrusius debesis. Atsitrenkimo rajonuose ima masiškai formuotis molekuliniai debesys. Juose atsidūrę gausūs dulkelių branduoliukai apauga organinių medžiagų ir ledų mantijomis paversdami debesis nepermatomai juodais. Gravitacinės jėgos, smūginių bangų ir kitokių faktorių suburtuose debesų sutankėjimuose prasideda ***žvaigždėdara.*** Dalis tamsios tarpžvaigždinės medžiagos patenka į žvaigždžių sudėtį, kita dalis šių naujagimių žvaigždžių yra išsklaidoma. Nykstančių molekulinių debesų juodos gelmės praskaidrėja, čia susiformavusios gausios jaunos žvaigždės pasidaro matomos. Iš jų masyviausios greitai sensta, tampa Volfo ir Rajė žvaigždėmis, cefeidėmis, raudonosiomis supermilžinėmis. Gali pasitaikyti ir supernova.

Kol įvyksta visi šie pasikeitimai, praeina dešimtys milijonų metų. Per tą laiką į vieną spiralinės vijos pakraštį įkritusi tarpžvaigždinė medžiaga perkerta skersai visą viją ir atsiduria kitame jos pakraštyje, žvaigždžių pavidalu nušvisdama dar vijos viduryje. Todėl tie spiralinių vijų pakraščiai, į kuriuos įkrinta tarpžvaigždinė medžiaga, yra juodi, nes čia daug dulkelių. Toliau nuo šio juodo pakraščio vijos žėri gausiomis jaunomis žvaigždėmis ir emisiniais ūkais. O priešinguose vijų pakraščiuose jau matosi ir trečiojo evoliucijos etapo masyvių žvaigždžių – cefeidžių bei raudonųjų supermilžinių. Ypač tai ryšku centrinėje spiralinių galaktikų diskų dalyje, kur nuotoliai iki galaktikos centro yra mažesni už korotacijos spindulį. Šiuo atveju juodai padabinti yra ne išoriniai, o vidiniai spiralinių vijų pakraščiai (žr., pavyzdžiui, **7.13**, **8.1**, **8.2**. **8.7**, **8.17** pav.).

6.6.3. Žvaigždžių poveikis tarpžvaigždinės medžiagos struktūrai

6.6.3.1. Žvaigždžių vėjo poveikis

Iš žvaigždžių lekia greitų elektringų dalelių srautai – ***žvaigždžių vėjas***. Jei jis pakankamai galingas, jo dalelės smogia į aplinkinę tarpžvaigždinę medžiagą, ją staiga labai suspaudžia ir priverčia irgi lėkti tolyn nuo žvaigždės. Dažnai žvaigždžių vėjo kinetinės energijos pakanka aplinkinei medžiagai išjudinti iki viršgarsinio greičio. Dalis žvaigždės vėjo kinetinės energijos dar virsta suspaustos medžiagos šilumine energija. Vadinasi, tarpžvaigždinėje medžiagoje atsiranda į visas puses viršgarsiniu greičiu plintanti riba, ties kuria staiga pakyla dujų tankis, temperatūra, slėgis, jonizacija. Tai ir yra ***smūginės bangos*** frontas. Smūginės bangos suspaustos, įkaitintos ir jonizuotos dujos švyti. Aplink kai kurias žvaigždes, ypač Volfo ir Rajė žvaigždes, matome silpnai švytinčius pluoštus. Ilgainiui, per dešimtis tūkstančių ar milijonus metų. aprimus žvaigždžių vėjui, tie pluoštai nustoja švytėti ir ataušta, jonizuoti jų atomai rekombinuoja. O suspaustos ataušusios dujos duoda pradžią naujiems nedideliems, bet greitiems difuziniams debesims.

6.6.3.2. Supernovų poveikis

Novų, o ypač supernovų sprogimai tarpžvaigždinę medžiagą veikia panašiai kaip ir žvaigždžių vėjas. Tik užmojai kur kas didesni. Aplink sprogusias supernovas susidaro didelės masės, stipriai šviečiantys burbulai ar pluoštai, vadinami ***supernovų likučių ūkais*** (žr. **6.2**, **6.31**, **25s** ir **27s** pav.). Juose sprogimo ištaškyta žvaigždės medžiaga yra susimaišiusi su pakeliui išjudinta tarpžvaigždine medžiaga, kurios besiplečiantis ūkas prisigrobia vis daugiau ir daugiau. Plėtimosi greitis pradžioje siekia tūkstančius km/s, o vėliau.

priešinantis pakeliui užklumpamai ir kartu nutempiamai medžiagai, sumažėja iki šimtų km/s.

Tokio besiplečiančio burbulo struktūra labai sudėtinga ir audringai kinta. Jame verda ir kunkuliuoja įvairios srovės ir sūkuriai. Temperatūra skirtingose vietose labai nevienoda – nuo keliolikos tūkstančių iki 2–3 milijonų K.

Atitinkamai sudėtingas ir tokių ūkų spektras. Didelė švytėjimo dalis susidaro visiškai taip pat, kaip ir emisiniuose ūkuose: matyti vandenilio ir helio ištisinis ir linijinis rekombinacinis spektras, nebulinės linijos, elektronų laisvųjų šuolių sukeltas radijo ir infraraudonasis ištisinis spektras. Tačiau kartu matyti ir Rentgeno ištisinis spektras bei emisijos linijos Rentgeno ir tolimojoje UV srityje. Tai laisvųjų elektronų stabdomojo spinduliavimo ir daug kartų jonizuotų atomų skleidžiami fotonai.

Pats burbulas ir burbulo apgaubta ertmė dar skleidžia ir sinchrotroninės kilmės radijo bangas (žr. **6.7.4.1.**). O tai reiškia, kad visas šis tūris užpildytas magnetinio lauko ir kosminių spindulių, kurių elektronai, skriedami spiralėmis apie magnetines linijas, ir skleidžia sinchrotroninės kilmės ištisinį spektrą. Dažniausiai tai tik radijo bangos. Tačiau kartais šis spektras siekia ir UV ar net Rentgeno sritį.

Supernovų sprogimai suspaudžia ir išjudina daug didesnius tarpžvaigždinės medžiagos kiekius negu žvaigždžių vėjas. Todėl ir jų vaidmuo naujų debesų (ne tik difuzinių, bet ir molekulinių) susidarymui turėtų būti gana svarbus. Dar reikia neužmiršti, kad supernovos lemia ir tai, jog nemažą taržvaigždinės medžiagos tūrio dalį užima vainikinės dujos.

Maždaug nuo 1995 m. astronomai pradeda įtarti, kad ypač retais atvejais gali įvykti žvaigždės sprogimas, galbūt šimtus kartų galingesnis už supernovų sprogimus. Tai vadinamosios ***hipernovos.*** Jų sukurti švytintys burbulai turėtų būti daug didesni, masyvesni, besiplečiantys didesniu greičiu už supernovų likučių ūkus. Galbūt mes jų dar nemokame patikimai atskirti nuo ***superburbulų,*** kuriuos aptarsime **6.6.3.3** skirsnelyje.

6.6.3.3. Žvaigždėdaros ir labai jaunų žvaigždžių poveikis

Tarpžvaigždinės medžiagos struktūrą labai keičia molekuliniuose debesyse prasidedanti ***žvaigždėdara*** (žr. **6.1.4**). Džinso nestabilumo formulė (**6.2**) reikalauja, kad, debesiui traukiantis, temperatūra didėtų ne sparčiau negu dydis $n^{1/3}$. Ši sąlyga tenkinama su dideliu kaupu. Juk didėjant tarpžvaigždinės medžiagos tankiui, temperatūra iš pradžių ne tik nedidėja, bet netgi mažėja, nes stiprėja šaldymas spinduliuojant. Dėl šios priežasties Džinso nestabilumo sąlygą (**6.2**) pradeda tenkinti net ir atskiros besitraukiančių sutankėjimų dalys. Sutankėjimai suskyla į atskirus fragmentus. Toks skaidymasis gali tęstis dar toliau.

Taip iš didelio debesų komplekso dažniausiai susidaro jaunučių žvaigždžių asociacija, kurios tūryje tai šen, tai ten tik ką (prieš šimtus tūkstančių ar

milijonus metų) susiformavo arba dar ir dabar tebetęsia savo formavimąsi įvairaus didumo, įvairios struktūros, įvairaus stabilumo žvaigždžių spiečiai ir kitokios grupės bei grupelės.

Šį susitraukimo ir skaidymosi vaizdą gerokai painioja magnetiniai laukai, turbulentinės srovės ir sūkuriai, smūginės bangos, atskirų besitraukiančių dujų bei dulkių gniužulų užsisukimas apie savo ašį. Tarpžvaigždinės medžiagos gniužulo fragmentui traukiantis, jame esančios magnetinio lauko jėgų linijos sutankėja, t. y. magnetinis laukas sustiprėja, jo magnetinės jėgos sukurtas slėgis padidėja ir ima trukdyti tolesniam traukimuisi, nors visiškai jo nesustabdo.

Besitraukiantys sutankėjimai ima suktis todėl, kad traukimosi pradžioje atskirų dujų dalelių ir dulkelių chaotiški judesiai nebūna visiškai simetriški. Gniužului traukiantis, visuomet išryškėja jų vyraujanti kryptis – tai ir yra sukimosi pradžia. Toliau traukiantis linijinis sukimosi greitis vis didėja dėl judesio kiekio momento tvermės dėsnio. Dėl to net gali būti pristabdytas tolesnis traukimasis ašiai statmena kryptim. O traukimuisi išilgai ašies sukimasis visiškai netrukdo. Todėl ilgainiui besitraukiantys debesys arba jų atskiros dalys susiploja. Jeigu jie nesugebėtų atsikratyti didelės judesio kiekio momento dalies, tai pavirstų ne žvaigždėmis, o kažkokiais diskais.

Judesio kiekio momento perskirstymas prasideda skaldantis į fragmentus, kurie ima individualiomis orbitomis skrieti apie buvusio vientiso gniužulo masės centrą. Didesnioji visos sistemos judesio kiekio momento dalis atitenka orbitiniam judėjimui, o mažesnioji – atskirų fragmentų sukimuisi apie savo ašis. Šitokį pasiskirstymą lemia magnetinis laukas, kurio jėgų linijos jungia atskirus fragmentus, o jiems sukantis, yra apie juos vyniojamos. Besipriešindamos vyniojimui, magnetinės linijos stumia fragmentus vieną nuo kito tolyn ir bando mažinti fragmentų sukimosi apie savo ašis greitį. O pastarieji, tęsdami savo susitraukimą, šį greitį vis bando didinti. Tuo būdu šis greitis dažnai lieka per didelis, ir dėl to aplink atsirandančią žvaigždę jos pusiaujo plokštumoje susiformuoja didžiulis ***aplinkžvaigždinis*** dujų ir dulkelių mišinio ***diskas***, kuriam atitenka nemaža judesio kiekio momento dalis.

Molekulinių debesų sutankėjimai savo traukimąsi pradeda labai iš lėto, nes dar silpnai jaučiama dalelių tarpusavio trauka. Atstumai tarp dalelių dideli, slėgis visai mažas, todėl traukimuisi beveik nėra pasipriešinimo. Besitraukiančio gniužulo arba jo fragmento dalelės tiesiog kriste krinta centro link įgaudamos beveik laisvojo kritimo pagreitį. Todėl traukimosi greitis po truputį vis didėja.

Gniužulo fragmentui traukiantis, mažėja jo potencinė energija, susijusi su jo dalelių gravitacine sąveika – vadinamoji gravitacinė energija. Dėl to didėja besitraukiančio fragmento dalelių kinetinė energija, kuri, susiduriant dalelėms, virsta šilumine energija. O pastarosios sąskaita sukuriami ilgabangių infraraudonųjų spindulių bei radijo fotonai, kurie pradžioje dėl mažo me-

džiagos tankio dar beveik laisvai išlekia iš besitraukiančio fragmento – ***prožvaigždės***. Todėl besitraukiančios prožvaigždės temperatūra iš pradžių visai nekyla, o paskui pradeda vos vos kilti.

Traukimosi pradžioje gravitacinės energijos išlaisvinama visai nedaug. Tačiau jau ir tada besitraukiančio tarpžvaigždinės medžiagos gniužulo infraraudonojo ir radijo spinduliavimo galia daug kartų pranoksta Saulės skleidžiamų visų bangų ilgių spindulių galią. Mat iš pradžių išsiskiriančiai gravitacinei energijai labai padeda energija, kurią prožvaigždės medžiaga gauna iš šalies – iš pralekiančių Rentgeno, kosminių ir ypač subkosminių spindulių. Vėliau, mažėjant prožvaigždės tūriui, šios pašalinės energijos gaunama vis mažiau, o gravitacinės energijos išskiriama vis daugiau. Prožvaigždės skleidžiamų tolimųjų IR spindulių galia dar padidėja.

Centrinė prožvaigždės dalis traukiasi greičiau. Greitai tankis joje tiek išauga, kad ji pasidaro nebeskaidri savo skleidžiamiems IR spinduliams. Didelė atsipalaidavusios gravitacinės energijos dalis ima kauptis šiluminės energijos pavidalu. Temperatūra prožvaigždės gelmėse smarkiai kyla, todėl, einant gilyn, ima smarkiai didėti ir dujų slėgis. Tai labai sulėtina tolesnį prožvaigždės centrinės dalies traukimąsi. Aukštesnieji sluoksniai, krisdami pagaliau pasiveja gilesniuosius ir į juos atsitrenkia. Susidaro smūginės bangos.

Centrinės, neskaidrios prožvaigždės dalies traukimasis dar keletą kartų tai spartėja, tai vėl lėtėja. Susitraukimas paspartėja kiekvieną kartą, kai gravitacinė energija pradedama naudoti medžiagos faziniams virsmams įvykdyti: molekulėms išardyti, vandenilio, o vėliau ir helio atomams jonizuoti, dulkelėms išgarinti. Šiais atvejais gravitacinė energija naudojama ne tiek šiluminei ir spinduliavimo energijai didinti, kiek medžiagos ryšiams suardyti. O laikotarpiais tarp šių fazinių virsmų prožvaigždės centrinės dalies temperatūra vis kyla.

Taip palaipsniui susidaro vis tankėjantis ir kaistantis branduolys – ***žvaigždės užuomazga***. Tačiau nuo mūsų akių ją slepia patys aukštieji, dar šalti prožvaigždės sluoksniai – prožvaigždės apvalkalas – kurio dulkelės iš giliau ateinančius visų bangų ilgių spindulius paverčia ilgųjų bangų infraraudonaisiais spinduliais. Žvaigždės užuomazgoje medžiagos kiekis sparčiai didėja, nes ant jos be paliovos krinta dujos iš tolesnių prožvaigždės vietų. Tai vadinamoji a k r e c i j a. Jos metu išsilaisvina daug gravitacinės energijos, kuri padeda palaikyti didelę prožvaigždės infraraudonojo spinduliavimo galią. Žvaigždės užuomazgos centre temperatūra išauga iki dešimčių tūkstančių, o vėliau ir iki milijonų laipsnių. Susidaro labai didelis temperatūros skirtumas tarp gelmių ir aukštesnių sričių. Dėl to centre susikaupusi didžiulė šiluminė energija (gauta iš gravitacinės energijos) ten nebeužsilaiko: ima nesustabdomai skverbtis į viršų. Tai gali vykti dviem būdais – konvekcijos ir spindulių skleidimo.

Jei taip formuojasi žvaigždė, kurios galutinė masė nėra didesnė nei maždaug 10 $M_{\odot}$, į ją sukrinta didžioji apvalkalo medžiagos dalis. Dar viena

jos dalis nubloškiama į diską pusiaujo plokštumoje. O apvalkalo likučius išsklaido naujagimės žvaigždės galingas vėjas, spindulių slėgis, išorinių sluoksnių audringumo apraiškos. Atsiradusi žvaigždė apsinuogina ir pasirodo HR diagramos viršutinėje dalyje. Taip tolimųjų IR spindulių šaltinis – pro-žvaigždė – virsta gelsva ar raudona pirmojo evoliucijos etapo žvaigžde, kuri dar traukiasi ir toliau, nes joje dar neprasidėjo vandenilio virtimo heliu branduolinės reakcijos. Ilgainiui tokios žvaigždės pasiekia pagrindinę seką. Tokios jaunos pirmojo evoliucijos etapo žvaigždės, matyt, yra Herbigo žvaigždės, orionidės (Tauro T tipo), cetidės (Banginio UV tipo) ir kitos įvairios joms giminingos labai greitai besisukančios ir labai audringos vėlyvesnių B poklasių ir A, F, G, K, M spektrinių klasių žvaigždės.

O jei žvaigždės masei lemta išaugti iki 10 $M_\odot$ ir daugiau, atitinkama pro-žvaigždė turi būti keliasdešimt ar kelis šimtus kartų masyvesnė už Saulę. Šiuo atveju didžioji jos medžiagos dalis negali nukristi ant labai masyvios žvaigždės užuomazgos – lieka sulaikyta jos aplinkoje, o vėliau išsklaidoma. Akreciją susilpnina, o vėliau ir visai nutraukia žvaigždės užuomazgos spindulių srautas ir vėjas. Labai išaugus žvaigždės užuomazgos masei, jie darosi itin galingi. Spindulių srautas savo slėgiu nebeleidžia dulkelėms kristi, stumia jas tolyn. Greitos vėjo dalelės krintančias molekules bei dulkeles irgi pasitinka stipriais smūgiais. Aišku, kad krintančios medžiagos apatinėje dalyje turi susidaryti grūstis. Molekulių koncentracija pasiekia 10^{10} cm^{-3}. Labai sutirštėja ir dulkelių šydas. Žvaigždės užuomazga, į kurią medžiaga jau nebegali nukristi, tampa savarankiška pirmojo evoliucijos etapo žvaigžde, kurios masė toliau nebedidėja.

Tačiau šios naujagimės žvaigždės mes vis dar negalime matyti – jos spindulių visiškai neišleidžia buvusios prožvaigždės periferijos medžiaga, kuri taip ir nesuspėjo sukristi į žvaigždę. Šios medžiagos vidinė, sutankėjusi dalis vadinama ***vidiniu kokonu***. Jis, lyg kokie labai stori vystyklai, visiškai apgaubia naująją žvaigždę ir sugeria visus jos spindulius. Apatinė vidinio kokono dalis dėl to įkaista iki 1000–3000 K, viršutinė dalis – iki 300–700 K. Kokonas pats tampa galingu artimųjų IR spindulių šaltiniu.

Tačiau iš pradžių ir šie spinduliai mūsų nepasiekia – juos sugeria dar aukštesni ir šaltesni buvusios prožvaigždės sluoksniai, iš kurių, veikiant vidinio kokono trumpabangių IR spindulių slėgiui, susiformuoja vadinamasis ***išorinis kokonas.*** Jo temperatūra tik 50–200 K. Jis visą iš giliau sklindančių spindulių energiją paverčia ilgabangių IR spindulių energija. Taigi tik šie spinduliai pradžioje ir gali pasiekti stebėtoją.

Ilgainiui vidinio kokono artimieji IR spinduliai šiek tiek išsklaido išorinio kokono medžiagą. Ji išsipučia ir praretėja, tada pro ją pradeda prasišviesti vidinis kokonas, taip pat besiplečiantis nuo viduje esančios žvaigždės spindulių. Šiuo metu, o gal ir anksčiau vidinio kokono vidinėje dalyje tai šen, tai ten ima veikti keli ar keli šimtai galingų H_2O mazerių (dar žr. **5.29.2**), dalį kokono IR spindulių energijos paverčiančių 1,348 cm mazerinės radijo emisijos linijos

energija. Atskirų mazerių skersmenys siekia vos vieną ar kelis a.v., o jų labai siauros vienintelės radijo emisijos linijos galia – net 10^{19}–10^{25} W. Mazerinio mechanizmo veikimo apimtų atskirų kokono sričių šitokį mažumą parodo greitas (per kelis mėnesius ar vos per kelias dienas) spinduliavimo galios, spindulinio greičio, poliarizacijos ir kitų mazerio charakteristikų kitimas. Atskiri mazeriai gali judėti vienas kito atžvilgiu dešimčių ar šimtų $km \cdot s^{-1}$ greičiais. Tai rodo Doplerio reiškinio sukeltas mazerinės linijos suskilimas. Vadinasi, kokono viduje vyksta stiprus turbulentinis judėjimas. Tokių IR spindulių bei H_2O mazerinių radijo bangų šaltinių rasta daugelyje žinomų molekulinių debesų kompleksų.

Per tūkstančius ar dešimtis tūkstančių metų kokonų viduje esanti masyvi žvaigždė galutinai susitraukia ir tampa O spektrinės klasės žvaigžde. Jos trumpabangiai ultravioletiniai spinduliai pradeda jonizuoti vidinio kokono vidinę dalį: aplink jaunutę žvaigždę susidaro greitai besiplečianti, iš pradžių labai maža ir kompaktiška H II zona – emisinio ūkio užuomazga. Tačiau nei pačios žvaigždės, nei šios mažytės H II zonos regimaisiais spinduliais mes vis dar negalime matyti – neleidžia kokonai.

Kai vidiniame kokone molekulių koncentracija sumažėja iki kelių milijonų cm^{-3}, H_2O mazeriai gęsta, o jų vietoje ima atsirasti OH mazeriai, skleidžiantys 18,599, 18,001, 17,980 ir 17,424 cm siauras, bet stiprias radijo emisijos linijas. Tokio mazerio galia irgi siekia 10^{19}–10^{22} W. Rečiau aptinkami daug silpnesni SiO (0,695 ir 0,700 cm) bei metilo alkoholio arba metanolo CH_3OH (linijų grupė ties 1,2 cm) mazeriai.

Kai atsiradusi H II zona šiek tiek padidėja, jos skleidžiamos radijo bangos, laisvai praėjusios pro abu besiplečiančius kokonus, gali būti užregistruotos mūsų radijo teleskopais. Svarbiausias šių nematomų H II zonų skiriamasis bruožas – vandenilio, o kai kada ir helio rekombinacinės kilmės radijo emisijos linijos (žr. **6.2.3.4**). Stebimi beveik taškiniai radijo linijų (Ridbergo ir OH mazerių) šaltiniai šiek tiek didesnių IR plėmų (kokonų) viduje.

Plečiantis jaunoms H II zonoms, žvaigždės L_S spinduliai, visiškai suardę ir jonizavę vidinį kokoną, pasiekia išorinį. Tokių objektų radijo švytėjimo zonos jau didesnės ir praktiškai sutampa su pačiais infraraudonųjų spindulių šaltiniais. Pagaliau po dešimtis ar šimtus tūkstančių metų trukusio infraraudonojo švytėjimo taip pat jonizuojamas ir išsklaidomas išorinis žvaigždės kokonas. Tuo metu O–B2 spektrinių klasių žvaigždės ir jas gaubiantys emisiniai ūkai pasidaro matomi, jeigu, žinoma, jų neužstoja kiti, arčiau mūsų esantys tamsūs debesys. Per kokį milijoną metų išsisklaido ir emisinis ūkas – žvaigždė lieka spindėti karštų ir retų tarpdebesinių dujų aplinkoje.

Jei kokonai gaubia vėsesnes B–A spektrinių klasių žvaigždes, jos nepajėgia sukurti H II zonų. Todėl nenuostabu, kad daugelyje tokių infraraudonųjų objektų nepavyksta aptikti radijo bangų šaltinių.

Sparčiai besitraukdamos masyvios žvaigždės per trumpą laiką išlaisvina milžiniškus gravitacinės energijos kiekius, o tai reiškia, kad ir šią energiją

perspinduliuojantys kokonai turi būti labai galingi spinduoliai – tūkstančius ir net šimtus tūkstančių kartų galingesni už Saulę. Būtent tokios galios infraraudonųjų spindulių šaltinius ir matome daugelyje didžiųjų molekulinių debesų.

Taigi visos naujagimės žvaigždės labai greitai sukasi apie savo ašis, skleidžia labai stiprų ir gūsingą vėją, yra stipriai įsimagnetinusios, jų išoriniai sluoksniai labai audringi. Herbigo žvaigždės, orionidės, cetidės ir kitos joms giminingos jaunos žvaigždės pasižymi daug stipresniu negu Saulė aktyvumu. Jų išoriniuose sluoksniuose vyksta magnetinių laukų anihiliacija, susidaro stiprios infragarso, smūginės, magnetohidrodinaminės bangos, išmetami plazmos fontanai, generuojami kosminiai spinduliai (žr. **6.7**). Orionidžių ir cetidžių aktyvumą labai skatina konvekcijos srovės, kurios ten iš išorinės pusės apima didžiąją žvaigždės tūrio dalį. Pačios karščiausios O ir B spektrinių klasių žvaigždės dar pažeria ir labai daug UV spindulių. Visa tai išsklaido ne tik savuosius apvalkalus ar kokonus, bet ir tolimesnes aplinkines dujas ir ten nutraukia žvaigždėdarą.

O šių reiškinių sukeltos smūginės bangos plinta tolyn per molekulinių debesų kompleksą ir gali sužadinti žvaigždėdarą tolesnėse jo srityse. Tai primena ligos epidemiją.

Tuo būdu seni molekuliniai debesys yra išsklaidomi. O išblaškyta medžiaga ilgainiui susirenka į naujus debesis. Tiesa, dalis tarpžvaigždinės medžiagos įstringa žvaigždėse. Todėl tarpžvaigždinės medžiagos galaktikose turėtų mažėti (jei nepasipildo iš tarpgalaktinės erdvės).

Grįžkime prie ***aplinkžvaigždinių*** dujų ir dulkelių ***diskų*** žvaigždžių pusiaujo plokštumose. Jie dar ilgai supa daugelį jaunų žvaigždžių, išskyrus masyvias ir karštas O, B, iš dalies A spektrinių klasių žvaigždes, kurios savo galingais spinduliais ir vėju tokį diską turėtų greitai išsklaidyti. Jei toks diskas yra pakankamai storas, tai jis pastoja kelią iš žvaigždės lekiantiems fotonams ir dujų dalelėms ne tik pusiaujo plokštumoje, bet ir toli į šonus nuo jos. Laisvesnis kelias lieka išlėkti tik iš atokiau nuo pusiaujo esančių žvaigždės plotų ir lėkti dideliu kampu su pusiaujo plokštuma. Taigi plazma iš šitokių žvaigždžių veržiasi ne į visas, o tik į dvi priešingas puses plačiai prasiskleidžiančiu kūgiu išilgai sukimosi ašies. Greitas žvaigždės sukimasis, stipri konvekcija, audros išoriniuose sluoksniuose magnetinį lauką padaro sudėtingos struktūros ir besikaitaliojantį. Sudėtingumą dar didina sąveika su aplinkžvaigždinio disko ir bipoliariškai (į dvi priešingas puses) besiveržiančio plazmos srauto magnetiniais laukais. Tai sukuria sudėtingą elektros srovių tinklą. Visa tai indukuoja tokį papildomą magnetinį lauką, kuris plačiai prasiskleidžiančiu kūgiu išlekiantį plazmos srautą stengiasi suglausti. Taip susidaro į dvi priešingas puses maždaug išilgai žvaigždės sukimosi ašies trykštančios ***karštosios plazmos čiurkšlės,*** prasiskleidžiančios 5°–20° kampu. Dažnai žvaigždės magnetinė ašis su sukimosi ašimi sudaro didesnį ar mažesnį kampą. Tai trikdo čiurkšlės pastovumą, priverčia ją visaip vinguriuoti, išsikreivinti.

Ši karšta čiurkšlė nusitempia su savimi dalį pakeliui užgriūtos aplinkžvaigždinio disko, žvaigždės kokono liekanų ir tolimesnių molekulinio debesies vietų medžiagos. Smogusi smūginė banga šią medžiagą įkaitina iki keliolikos tūkstančių K. Dulkelės išgaruoja, molekulės suyra, visa medžiaga jonizuojama ir dėl to ima švytėti. Užtat nuo 1000 $km \cdot s^{-1}$ (maždaug toks buvo pradinis žvaigždės vėjo greitis) iki 40–600 $km \cdot s^{-1}$ sumažėja čiurkšlės greitis. Įgijus papildomos medžiagos, plazmos koncentracija čiurkšlėje pasidaro dešimtys ar šimtai dalelių cm^{-3}. Tokios čiurkšlės pasiekia 0,01–2 pc nuotolius. Jos spinduliuoja panašiai kaip ir emisiniai ūkai.

Tačiau tik retai kurią karštąją čiurkšlę galima matyti, o dažniausiai dar ir ne visą. Mat čiurkšles užstoja ir aplinkžvaigždinio disko (jei čiurkšlės lekia tiesiog tolyn ar įstrižai tolyn nuo mūsų), ir kokono liekanų, ir tolimesnių dar vis galutinai neišsklaidyto molekulinio debesies vietų dulkelės.

Pro tamsių ūkų properšas prasišviečiantys mažyčiai 1–10″ skersmens čiurkšlių lopinėliai vadinami ***Herbigo ir Haro (HH) objektais***. Juos 1954 m. nepriklausomai aptiko JAV astronomas Džordžas Herbigas (*G. H. Herbig*) ir meksikietis Giljermas Haro. Turbulentinės srovės molekulinių debesų viduje, ypač žvaigždėdaros rajonuose, nėra pastovios. Jos vienas properšas uždaro, o atidaro kitas. Taip pat nepastovios ir čiurkšlės. Todėl HH objektai labai keičiasi, per kelis metus ar mėnesius vieni gali net visai išnykti, o netoliese atsirasti kiti. Dalis HH objektų gali būti ne pro properšas matomos čiurkšlių dalys ar skaistesni mazgai čiurkšlėje, o gūsingų bei besikraipančių čiurkšlių ir aplinkinės suaudrintos tamsios medžiagos sąveikos rezultatas – švytinčios „salos“, besiskverbiančios per tamsios medžiagos aplinką. Jas laikinai jonizavo ir tuo būdu privertė trumpam švytėti smūginės bangos. Tai tarytum kažkokios čiurkšlių atplaišos. HH objektai yra vienas iš ženklų, rodančių, jog toje srityje vyksta žvaigždėdara.

Stebimos ir kitokios rūšies čiurkšlės, tiksliau kalbant, šaltų ir tamsių dujų bei dulkelių mišinio srautai. Jie ir vadinami ***bipoliškaisiais molekuliniais srautais***. Jie 5–100 $km \cdot s^{-1}$ greičiu srūva į dvi priešingas puses maždaug išilgai naujagimės žvaigždės sukimosi ašies ir pasiekia 0,04–4 pc nuotolius. Šių šaltų srautų prasiskleidimo kampas dvigubai – keturgubai didesnis negu karštųjų čiurkšlių. Panašu, kad čia prarandama naujagimę žvaigždę tebeslepiančio kokono medžiaga. Prisigrobus dar ir pakeliui užkluptos medžiagos, srauto masė pasidaro 0,1–200 $M_{\odot}$. Besiveržiančio srauto smūgių į aplinkinio molekulinio debesies medžiagą sukeltos smūginės bangos srauto temperatūrą pakelia iki kelių šimtų ar net 1000–3000 K. Srauto dujų dalelės ima stipriau daužytis. CO molekulės sužadinamos ne tik į apatinio vibracinio lygmens įvairius rotacinius lygmenis, kaip šaltesnėse molekulinių debesų vietose, bet ir į antrojo ar trečiojo vibracinio lygmens gana aukštus rotacinius lygmenis. Taip atsiranda ne tik radijo, bet ir ilgųjų IR spindulių diapazono CO molekulių emisijos linijos, leidžiančios pažinti ir stebėti šiuos tamsius srautus tamsaus



6.19 pav. *Tamsusis Kūgio ūkas Vienaragio žvaigždyne labai jauno padrikojo žvaigždžių spiečiaus NGC 2264 ir jį gaubiančio emisinio ūko pakraštyje. Nuotrauka apima spiečiaus ir emisinio ūko mažą pakraštėlį. Tai už 800 pc esančio stambaus žvaigždėdaros rajono dalis. Emisinio ūko fone matome tamsaus bipoliškojo molekulinio srauto įstrižai į mus srūvantįjį 2,5 pc ilgio komponentą. Priešingasis komponentas ir pati srautus sukūrusi naujagimė žvaigždė užstoti aplinkžvaigždinio disko ir kitos aplinkinės tamsios medžiagos. Ties srauto pradžia, kur turėtų būti pati žvaigždė, matome didelio skaisčio šviesų plėmą. Čia švyti šiapus pagrindinių tamsios medžiagos sankaupų esančios trys 14 mag žvaigždės ir UV spindulių bei smūginių bangų jonizuotos dujos. Šiame tebesiformuojančiame spiečiuje matosi ir daugiau susitraukimo stadijos žvaigždžių. Pavyzdžiui, rodyklė rodo 3 mln. metų amžiaus 16 mag orionidę KH 15D, kurios aplinkžvaigždiniame diske, atrodo, jau esama besiformuojančių planetų*

molekulinio debesies viduje. Šiuos srautus išskirti iš šaltesnės molekulinio debesies aplinkos gali padėti ir H_2 molekulių draustinės rotacinės IR emisijos linijos. Judėjimo ypatybes padeda suvokti Doplerio reiškinys.

Kaip matome iš pateiktų masės ir greičio duomenų, kai kurie masyvūs ir greiti bipoliškieji molekuliniai srautai turi gana didelę kinetinę energiją, net iki 10^{40} J. Tokiam srautui išjudinti žvaigždės vėjo ir visokių plazmos fontanų energijos aiškiai nepakanka. Matyt, šiuo atveju molekuliniam srautui kažkokiu dar nenustatytu būdu tenka ir dalis aplinkžvaigždinio disko energijos. O visų energijos virsmų šaknys – gravitacinė energija. Masyviausieji bipoliškieji molekuliniai srautai – tai jau nauji maži, tačiau palyginti didelio tankio

molekuliniai debesėliai, atsirandantys žvaigždėdaros ardomų didžiųjų molekulinių debesų griuvėsiuose.

Kai kurie bipoliškieji molekuliniai srautai yra palyginti mažo tankio, gerokai iškrikę, prasiskleidžiantys didesniu kampu, todėl trumpesni, tepasiekiantys mažesnius nuotolius. Į juos prasiskverbia juos sukūrusios jaunos žvaigždės spinduliai, nes jų optinis tankis $\tau < 1$. Dažniausiai ta žvaigždė yra orionidė. Ji nepakankamai karšta, kad galėtų jonizuoti vandenilį. Todėl srauto dujos lieka tamsios. Švyti tik dulkelės, išsisklaidydamos žvaigždės šviesą. Jei šiai šviesai nėra kliūčių pasiekti Žemę, matome savotiškos formos atspindžio ūką. Jei Žemė yra netoli žvaigždės pusiaujo ir jos aplinkžvaigždinio disko plokštumos, abu į priešingus šonus statmenai šiai plokštumai srūvantys srautai gali būti neužstoti, matomi. Toks atspindžio ūkas panašus į švytintį per vidurį persmaugtą smėlio laikrodį ir vadinamas ***bipoliškuoju atspindžio ūku.*** O pačią žvaigždę užstoja į mus briauna pasisukęs tamsus ir nematomas aplinkžvaigždinis diskas. O jei vienas srautas įstrižai artėja į mus, o kitas tolsta, matome tik vieną „smėlio laikrodžio" pusę – maždaug kūgio pavidalo artėjantį srautą. Tolstantysis srautas lieka užstotas aplinžvaigždinio disko ir kitos tamsios medžiagos, kuri dar išliko jaunutės žvaigždės aplinkoje. Toks atspindžio ūkas panašus į kometą su plačiai prasiskleidusia trumpa uodega ir vadinamas ***kometiškuoju ūku.*** Nauja žvaigždė ir šiuo atveju paprastai lieka užstota, nematoma. Ir bipoliškųjų, ir kometiškųjų ūkų apšvietėjos dažniausiai esti orionidės, vadinasi, kintamosios žvaigždės, todėl ir jų ūkų skaistis netaisyklingai kinta.

Jei susiklosto palankios aplinkybės, aplinkžvaigždiniame diske ima formuotis planetos. Todėl aplinkžvaigždiniai diskai, bent tie iš jų, kuriems negresia greito išsklaidymo pavojai ir kurie yra didelio tankio ir gana šalti arba net galima įtarti juose jau vykstantį planetų formavimosi procesą, dar vadinami ***proplanetiniais diskais***.

Ne visos žvaigždės užbaigia savo ir savo planetų formavimąsi tūnodamos tamsaus molekulinio debesies gilumoje ir tuo būdu būdamos apsaugotos nuo išorinių poveikių. Juk sparčiausiai susiformavusių ir suspėjusių išsklaidyti savo kokonus pačių masyviausių žvaigždžių labai gausūs spinduliai, ypač ultravioletiniai ir labai stiprus vėjas pradeda sklaidyti ir tolimesnes molekulinio debesies vietas, apnuogindami ten užkluptas lėčiau evoliucijonuojančias mažesnės masės žvaigždutes. Šių apnuogintų, dar nesuspėjusių galutinai susiformuoti žvaigždučių proplanetinius diskus užgriūna galingas kitų, jau susiformavusių masyviųjų žvaigždžių UV spindulių ir vėjo dalelių srautas. Dalis proplanetinio disko medžiagos jonizuojama, ima švytėti, stumiama tolyn, visiškai apgaubia viduje esančią žvaigždutę. Taip atsiranda išsitempusio lašelio formos silpnai švytinti dėmelė, pavadinta ***proplidu***. Šis pavadinimas susijęs su įsitikinimu, kad viduje slypi žvaigždutė su proplanetiniu disku. Tačiau juk diskas jau gerokai deformuotas, šiek tiek išsklaidytas. Kažin ar jame

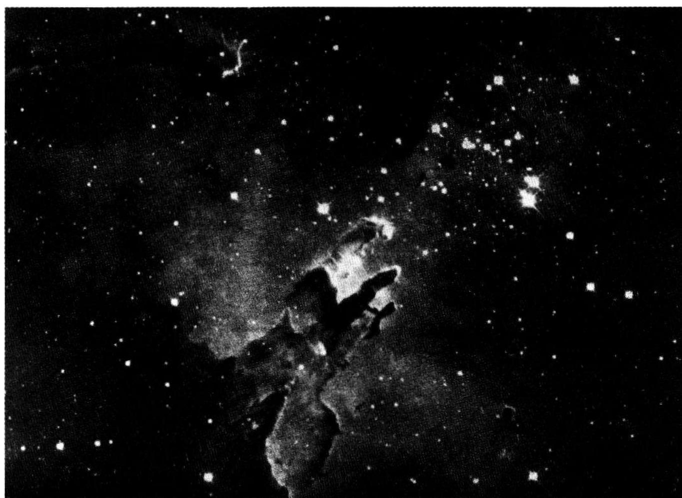


6.20 pav. *Kometiškasis atspindžio ūkas NGC 2261, arba Hablo kintamasis ūkas, arba Vienaragio R ūkas. Jis yra tame pačiame žvaigždėdaros rajone, kurio dalis parodyta ir* **6.19** *pav. NGC 2261 atveju bipoliškasis molekulinis srautas yra daug mažesnio tankio, todėl į jį prasiskverbia srautą sukūrusios naujagimės kintamosios žvaigždės Vienaragio R spinduliai ir jį paverčia atspindžio ūku. Matosi tik įstrižai į mus srūvantysis srauto komponentas. Priešingasis komponentas užstotas dulkelių*

besusiformuos planetos. Tokių proplidų rasta bent keliose žvaigždėdaros srityse, o gausiausiai – Oriono ūko rajone.

Įsitikinome, kad masyvios naujos žvaigždės išsklaido vienus debesis ir kartu paskatina kitų debesų atsiradimą. Jos tai atlieka veikdamos ne tik savo vėjo bei spindulių slėgiu, čiurkšlėmis, smūginėmis ir magnetohidrodinaminėmis bangomis, bet ir jonizuodamos aplink save vandenilį bei helį. Tuo būdu jos sukuria naujas H II zonas – emisinius ūkus. Dėl jonizacijos temperatūra ten pakyla iki 15 000 K. Kartu išauga ir dujų slėgis. Jis pasidaro daug didesnis negu tolimesnėje aplinkoje, kur nesiekia L_s spinduliai. Naujai atsiradusi, pradžioje dar visai mažytė H II zona dėl to plečiasi 10–20 km/s grečiu. Šis greitis irgi didesnis už garso greitį tarpžvaigždinėje medžiagoje, todėl ir vėl susidaro smūginė banga. Ji suspaudžia ir nustumia aplinkinę nejonizuotą medžiagą.

Aplink besiplečiančią H II zoną atsiranda sutankėjusios medžiagos apvalkalas, kurio vidinę, į H II zoną atgręžtą dalį ima jonizuoti žvaigždės L_s spinduliai. Naujai jonizuotos vietos dėl didesnio tankio šviečia skaisčiau negu visa H II sritis. Tai – stipriau šviečiantys ***apvadai*** aplink emisinius ūkus. Dėl jonizacijos pakyla apvadų temperatūra, jie sklaidosi ir retėja. Jų medžiaga papildo emisinio ūko medžiagą. Taip didėja ne tik emisinio ūko tūris, bet ir



6.21 pav. *Emisinis ūkas „Erelis", arba M 16, arba NGC 6611 Gyvatės (Gyvatės Uodegos) žvaigždyne prie pat Skydo žvaigždyno ribos. Iki jo maždaug 2000 pc. Jis primena išskleistais sparnais sklandantį erelį, kurio galvoje žėri jaunų žvaigždžių padrikasis spiečius (uodegos nėra). Karščiausios spiečiaus žvaigždės jonizuoja aplinkinio molekulinio debesies dalį tuo būdu sukurdamos emisinio ūko švytėjimą. Gerai matyti skaisčiau švytintys apvadai šviesios ir tamsios medžiagos ribose, ypač aplink „dramblio straublius" ir globules. Tai besiplečiančio ūko suspausta, sutankinta, visiškai neseniai buvusi tamsi medžiaga, dabar jau jonizuota ir prijungta prie emisinio ūko*

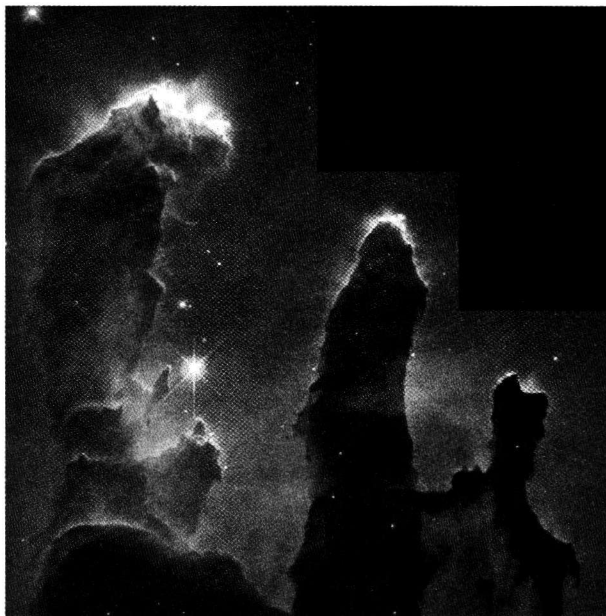
jo masė. O nuo žvaigždės tolstanti smūginė banga suspaudžia naujus, vis didesnius šaltų dujų kiekius. Dalis šių suspaustų dujų irgi gali tapti naujais nedideliais debesimis.

Plečiantis emisiniam ūkui, pakeliui gali pasitaikyti daug didesnio tankio vieta, kuri nelabai tepasiduoda nustumiama. Tuomet H II zona ją apeina. Taip emisinių ūkų teritorijoje atsiranda ilgi tamsios medžiagos iškyšuliai, lyg kokie pusiasaliai, kartais vadinami ***dramblio straubliais***. Vienas iš jų primena Italijos pusiasalį, todėl taip ir pavadintas. Dar vienas gavo Arklio Galvos vardą. Jie labai suspaudžiami ir suskaldomi į dalis, tampa juodomis salomis emisiniame ūke. Tokios salos, kaip ir mažos juodos dėmelės Paukščių Tako fone, pavadintos ***globulėmis***. (žr. **6.3**, **6.4**, **6.18**, **6.21**, **6.22**, **22s**, **24s**, **26s** pav., antrąjį, trečiąjį ir ketvirtąjį viršelio puslapį).

Jei stambus žvaigždžių spiečius susiformuoja beveik pačiame molekulinio debesies centre ir tame spiečiuje gimsta daug labai masyvių žvaiždžių, tai aplink jas atsiradę emisiniai ūkai plėsdamiesi susilieja vienas su kitu ir ima į visas puses tolyn stumti molekulinio debesies likučius. Taip aplink išretėjusias karštas jonizuotas dujas susidaro milžiniškas burbulo formos šaltų dujų apvalkalas, kuris toliau besiplėsdamas prisigrobia daug aplinkinių debesų ir jų aureolių medžiagos. Jame ima vyrauti nebe molekulės, bet vandenilio atomai.

Tokie ***superburbulais*** pavadinti apvalkalai išpučiami net iki 200–600 pc skersmens. Vadinasi, kartais jie nebeišsitenka Galaktikos dujų lęšyje. Iš jų vidaus išsiveržusi plazma papildo karštų vainikinių dujų aureolę, gaubiančią Galaktikos šaltų dujų lęšį. Ilgainiui iš superburbulų apvalkalų turi susiformuoti nauji labai masyvūs debesys, kuriuose atomai susijungia į molekules.

Matome, kad dėl žvaigždžių poveikio gali susidaryti daug naujų įvairios (dažniausiai mažos) masės tarpžvaigždinės medžiagos debesų. Ir ne tik susidaryti, bet ir įgyti keliolikos ar keliasdešimties km/s chaotiškų judesių greičius vienas kito atžvilgiu.



6.22 pav. *Hablo kosminiu teleskopu stebėti trys didžiausi, kelių šviesmečių ilgio Erelio ūko „dramblio straubliai", primenantys gigantiškus stulpus (dar žr.* **6.21** *pav.). (Pasitelkus lakią vaizduotę, juos galima laikyti ir* **6.21** *pav. pavaizduoto sklandančio beuodegio erelio nagais.) Tai buvusio vientiso molekulinio debesies likučiai, kuriuos besiplečianti H II zona perskyrė, apėjo iš visų šonų ir suspaudė. Stulpų ir jų atšakų viršūnes ardo erelio galvoje (viršuje, už paveikslo ribų) esančio jauno spiečiaus karščiausiųjų žvaigždžių UV spinduliai. Dulkelės garuoja, molekulės skyla į atomus, kurie jonizuojami ir ima skaisčiai švytėti. Ardymui nepasidavusios didesnio tankio vietos virsta sąlyginai nedideliais „piršteliais". arba pailgais „lašeliais". Tai vadinamosios* ***garuojančios globulės****. Kai kurių jų viršūnėse IR spinduliais jau aptinkamos besiformuojančios mažos masės žvaigždutės, tiksliau, žvaigždučių užuomazgos, kurių masė dar tebedidėja dėl akrecijos. Tačiau daugumos jų masė taip ir nesuspės pastebimai padidėti, nes gana greitai visiškai išsisklaidys jas apgaubusios garuojančios globulės – „pirštelių" galvutės arba nuo trumpėjančių stulpų jau atitrūkę „lašeliai". Erelio ūke aptiktos net 74 tokios garuojančios globulės. Dauguma jų matoma ir šiame paveiksle. Panašių tamsių stulpų su garuojančiomis globulėmis rasta ir dar keliuose milžiniškuose emisiniuose ūkuose*

Beskriedami apie galaktikos centrą, ir nauji, ir seni debesys susiduria vieni su kitais. Kai kurie susidūrimai baigiasi abiejų debesų susiliejimu į vieną. Šitaip maži debesys kartais gali išaugti į labai didelius ir masyvius. Nesimetriški smūgiai susidūrusius debesis priverčia pradėti suktis apie jų ašis.

6.6.4. Reilio, Teiloro ir Parkerio nestabilumas

Manoma, kad superdebesų, kitokių debesų kompleksų, pačių stambiausių molekulinių debesų susidarymui svarbią įtaką gali turėti ir savotiška magnetinio lauko bei gravitacijos sąjunga – vadinamasis ***Reilio, Teiloro ir Parkerio nestabilumas***, pavadintas anglų fizikų *J. V. Rayleigh*, *J. I. Taylor* ir amerikiečių fiziko *E. N. Parker* pavardėmis. Kaip pasireiškia ši sąjunga?

Galaktikos diske esanti tarpžvaigždinė medžiaga sukasi apie ašį, kuri eina per Galaktikos centrą ir yra statmena disko plokštumai. Į centrą nukreiptą traukos jėgą galima suskaidydi į du sandus. Tarkime, kad vienas jų statmenas sukimosi ašiai ir nukreiptas jos link. Tuomet antrasis turėtų būti nukreiptas išilgai ašies, pagrindinės Galaktikos plokštumos link.

Pirmąjį sandą kompensuos besisukančios medžiagos pastangos iš inercijos lėkti tiesiai, liestinės kryptimi. O štai antrasis gravitacijos jėgos sandas lieka nekompensuotas. Jis traukia tarpžvaigždinę medžiagą į vieną plokštumą, stengiasi iš jos padaryti kuo plonesnį lęšį. Bet tam priešinasi tarpžvaigždinės medžiagos slėgis ir magnetinis laukas. Tarpžvaigždinei medžiagai traukiantis, skersai kelio atsidūrusios magnetinio lauko jėgų linijos tempiamos kartu, taigi jos suspaudžiamos ir sutankinamos. Dėl to magnetinis laukas sustiprėja, o jo linijos pasidaro beveik lygiagrečios pagrindinei Galaktikos plokštumai. Pagaliau jos pasidaro pajėgios pasipriešinti gravitacijai ir sulaikyti tarpžvaigždinę medžiagą nuo dar didesnės koncentracijos į vieną plokštumą. Jei to nebūtų, tarpžvaigždinės medžiagos tankis labai padidėtų, žvaigždėdara paūmėtų, žvaigždžių statybinės medžiagos likučiai greitai išsieikvotų. Vadinasi, magnetinis laukas tarsi užkonservavo dalį tarpžvaigždinės medžiagos ir taip ją išsaugojo iki mūsų dienų, duodamas daug peno fizikų tyrimams ir padėdamas mums atskleisti didžiąją žvaigždžių gimimo paslaptį.

Antra vertus, tos pačios magnetinės linijos kartais nebeatsilaiko prieš gravitaciją ir imi veikti su ja išvien.

Įsivaizduokime horizontalias gumines grindis, ant kurių užpiltas lygus vandens sluoksnis. Jei kur nors grindys nors truputį įlinks, į susidariusią duobutę pribėgs daugiau vandens, ir grindys dar labiau įlinks. Duobutė padidės, vandens joje atsiras dar daugiau. Guma tempsis vis labiau, kol pagaliau jos tamprumo jėga pasipriešins dar gilesniam įlinkimui. Grindų funkcijas atlieka pagrindinei Galaktikos plokštumai lygiagrečios magnetinės linijos. Galima įsivaizduoti, kad jos sudaro ištisą daugiaaukščio namo daugelio atskirų aukštų

grindų sistemą. Kryptis „žemyn“ šiuo atveju yra pagrindinės Galaktikos plokštumos link. (Jei nebūtų sukimosi apie Galaktikos ašį, kryptis „žemyn“ būtų Galaktikos centro link.) Jei kuriame nors aukšte magnetinėse linijose atsiranda nors ir nedidelis įlinkimas „žemyn“, į tą vietą iš aplinkos išilgai magnetinių linijų ima tekėti plazmos savybių turinti tarpžvaigždinė medžiaga, savo sunkiu dar labiau įlenkdama minėtas linijas. „Magnetinė duobė“ vis gilėja ir platėja, į ją srūva vis didesni ir didesni tarpžvaigždinės medžiagos kiekiai, kurie čia labai sutankėja ir gali sudaryti mūsų stebimus didžiuosius debesų kompleksus su molekuliniais debesimis. Tai ir yra minėtasis Reilio, Teiloro ir Parkerio nestabilumas. Galiausiai „duobės“ dugne linijos tiek sutankėja, kad daugiau nebepasiduoda suspaudžiamos.

Jeigu nebūtų visų šių **6.6** poskyryje suminėtų faktorių, sąlygojančių tarpžvaigždinės medžiagos struktūrą, šaltų dujų lęšis, išsitempęs per visą Galaktikos skersmenį, vis tiek neišvengtų susiskaldymo į atskirus labai stambius debesis, nes, būdamas nesusiskaldęs, jis atitiktų Džinso gravitacinio nestabilumo sąlygą (**6.2**).

6.7. KOSMINIAI SPINDULIAI

6.7.1. Kas yra kosminiai spinduliai? Jų charakteristikos

Kosminiai spinduliai – tai beveik šviesos greičiu judančių protonų, kitų atomų branduolių, elektronų ir kitokių elektringųjų dalelių **dujos**, nepaprastai mažu tankiu užpildančios galaktikų tūrius. Kosminių spindulių dalelės dar vadinamos ***reliatyvistinėmis dalelėmis***, nes dėl didelio greičio joms darosi pastebimi specialiosios reliatyvumo teorijos reiškiniai. Pavyzdžiui, judančioje dalelėje sulėtėja laiko tėkmė. Kol nejudanti dalelė išgyvena laiko intervalą t_0, greičiu v judanti dalelė išgyvena trumpesnį laiko intervalą t:

$$t = t_0\sqrt{1-(v/c)^2}. \qquad (6.21)$$

Judančios dalelės masė m pasidaro didesnė už jos rimties masę m_0:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}. \qquad (6.22)$$

Reliatyvistinės dalelės visa energija

$$E = m_0c^2 + E_k = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = mc^2; \qquad (6.23)$$

čia E_k yra dalelės kinetinė energija.

Jei reliatyvistinė dalelė yra atomo branduolys, susidedantis iš dviejų ar daugiau nukleonų, dažnai energija skaičiuojama vienam nukleonui:

$$\varepsilon = \frac{E}{A} \quad \text{ir} \quad \varepsilon_{\text{k}} = \frac{E_{\text{k}}}{A}; \qquad (6.24)$$

čia A yra branduolio masė atominiais masės vienetais, taigi nukleonų skaičius.

Vienas iš svarbiausių duomenų, apibūdinančių kosminius spindulius, yra jų ***intensyvumas I***. Tai ***skaičius*** tokių reliatyvistinių dalelių, kurių judėjimo kryptys išsitenka vienetiniu erdviniu kampu prasiskleidžiančiame kūgyje ir kurios per vienetinį laiką kerta vienetinio ploto paviršių, statmeną judėjimo krypčių vidurkiui. Jei skaičiuojamos tik tos dalelės, kurių kinetinė energija telpa vienetiniame energijos verčių intervale tarp verčių E_{k} ir $E_{\text{k}} + 1$ GeV (1 eV = $1{,}6020 \cdot 10^{-19}$J), tai jų skaičius vadinamas ***intensyvumo energiniu tankiu*** ir žymimas $I(E_{\text{k}})$. Jei skaičiuojamos visos dalelės, kurių kinetinė energija didesnė už tam tikrą vertę E_{k}, gaunamas vadinamasis ***integralinis intensyvumas***, žymimas $I(> E_{\text{k}})$. Aišku, kad

$$I(> E_{\text{k}}) = \int_{E_{\text{k}}}^{\infty} I(E_{\text{k}})dE. \qquad (6.25)$$

Tarus, kad vienetinis erdvinis kampas yra 1 steradiano didumo ir kad kosminių spindulių dalelės juda izotropiškai (visomis kryptimis vienodai), kosminių spindulių koncentracija (vienetiniame tūryje kiekvienu momentu užklumpamų visomis kryptimis lekiančių dalelių skaičius)

$$N = \frac{4\pi I}{v}, \qquad (6.26)$$

čia $v \approx c$ – dalelės greitis.

Iš Galaktikos erdvių į Saulės sistemą netrukdomai patenka tik tos kosminių spindulių dalelės, kurių $E_{\text{k}} > 10$ GeV. Mažesnių energijų dalelėms, vadinamoms ***minkštaisiais kosminiais spinduliais***, kelią iš dalies pastoja Saulės vėjo nešamas magnetinis laukas. Keleto GeV energijos dalelės į Saulės sistemą įlekia ne visos – dalis jų nukreipiama pro šalį. O dalelės, kurių $E_{\text{k}} < 100$ MeV, dažniausiai jau ir kosminiais spinduliais nebevadinamos. Nevertėtų jų vadinti ir reliatyvistinėmis dalelėmis. Kai kurie autoriai joms suteikia ***subkosminių spindulių*** vardą. Galaktikose jų turėtų būti daug daugiau negu tikrųjų kosminių spindulių. Tačiau iš tarpžvaigždinės erdvės į Saulės sistemos vidų prasiskverbia tik visiškai maža jų dalis.

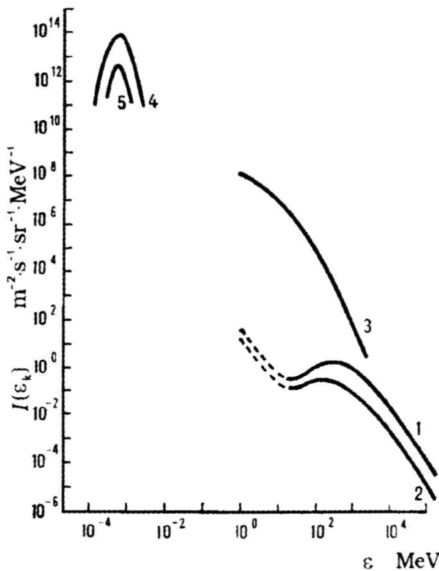
Saulės aktyvumo maksimumo metais Saulės vėjas būna ne tik stipresnis, bet ir labai netvarkingas – tarytum sudarytas iš atskirų nevienodo greičio plazmos debesų, kurių nešamas magnetinis laukas irgi nevienodas bei supainiotas. Tokie magnetiniai debesys keičia kosminių spindulių, ypač minkštųjų, kryptį, juos išsklaido. Todėl iš tarpžvaigždinės erdvės atlėkusių minkštųjų kosminių spindulių aktyvios Saulės metais ties Žemės orbita esti keliskart mažiau negu ramios Saulės laikotarpiu. Užtat Saulės aktyvumo maksimumo metu daug kartų pagausėja subkosminių ir minkštųjų kosminių spindulių, išlekiančių

iš pačios Saulės. Galingi ir dažni Saulės žybsniai elektringąsias daleles kartais pagreitina net iki 100 GeV. Šiek tiek subkosminių spindulių pagamina ir didžiųjų planetų bei Žemės magnetosferos.

Kosminių spindulių registravimo duomenys, taip pat ir visa kita ligšiolinė patirtis rodo, kad galaktikose kosminių spindulių dalelių tuo mažiau, kuo didesnė dalelės energija. Intensyvumo I ir koncentracijos N mažėjimas yra rodiklinio pobūdžio:

$$I(E) = KE^{-\gamma}. \qquad (6.27)$$

Tai ***kosminių spindulių energijos spektro dėsnis***. Čia K ir γ yra konstantos, galinčios skirtis įvairių rūšių reliatyvistinėms dalelėms, įvairioms galaktikoms, pagaliau įvairioms tos pačios galaktikos vietoms. Daugelyje mūsų Galaktikos vietų dideliam energijos E intervalui tarp 10 ir 10^6 GeV laipsnio rodiklio γ vertė yra maždaug 2,6. Taigi registruojant vis 10 kartų energingesnes daleles, kaskart užfiksuojamas maždaug 400 kartų mažesnis jų skaičiaus energinis tankis. Kai dalelių energija būna didesnė nei 10^6 GeV, jų skaičius mažėja dar greičiau, γ vertė išauga iki 3 ar 3,3. Pavyzdžiui, pro 1 m^2 plotą kas sekundę pralekia 250 tokių reliatyvistinių dalelių, kurių $E_k > 15$ GeV. Ir tik kartą per kelias dienas 10 km^2 plotą kerta tokia ultrareliatyvistinė dalelė, kurios $E_k > 10^{19}$ eV. Pasitaiko dalelių, kurių E_k siekia 10^{22} eV.



6.23 pav. *Kosminių spindulių ir Saulės vėjo dalelių intensyvumo energinio tankio $I(\varepsilon_k)$ virš Žemės atmosferos logaritminė priklausomybė nuo dalelės energijos vienam nuklonui ε: 1 – Galaktikos protonų, 2 – Galaktikos α dalelių, 3 – Saulės žybsnių protonų, 4 – Saulės vėjo protonų, 5 – Saulės vėjo α dalelių*

Kosminių spindulių koncentracija (jeigu nepaisysime už Saulės sistemos ribų lakstančių subkosminių spindulių, kurie mūsų nepasiekia ir todėl tebėra nežinoma jų koncentracija ir energinis spektras) yra nepaprastai maža – vienai dalelei tenka 10^4 m^3 Galaktikos erdvės. O vienos dalelės vidutinė energija yra labai didelė – apie 3 GeV. Todėl kosminių spindulių energijos tankis u nėra labai mažas: $u = NE_{vid} \approx 10^{-13}$ $J/m^3 \approx$ 0,5 eV/cm^3. Reikšminga, kad maždaug toks pat yra ir Galaktikos magnetinio lauko energijos tankis, ir tarpžvaigždinės medžiagos kinetinės bei šiluminės energijos tankis, ir net žvaigždžių spindulių, sklindančių tarpžvaigždine erdve, vidutinis energijos tankis.

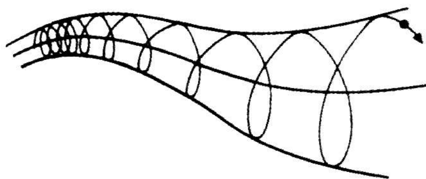
Iš tarpžvaigždinės erdvės į Saulės sistemos vidų įlekiančių kosminių spindulių dalelių apytiksliai 91% sudaro protonai, 7% – α dalelės (helio branduoliai), 1% – elektronai, truputį mažiau nei 1% – už helį sunkesni branduoliai, 0,1% – pozitronai, 0,02–0,05% – antiprotonai. Saulės kosminių spindulių cheminė sudėtis yra tokia pat kaip ir pačios Saulės.

Laisvos elektringosios dalelės magnetiniame lauke negali judėti bet kaip. Be kliūčių jos lėktų tik išilgai tiesių magnetinių jėgų linijų. Tačiau tikrovėje taip niekada nebūna. Dalelės judėjimo kryptis visada bus daugiau ar mažiau įstriža magnetinio lauko krypčiai. Be to, ir magnetinio lauko jėgų linijos nebūna tiesios. Todėl visada galima tarti, kad dalelės greičio vienas komponentas yra nukreiptas išilgai magnetinio lauko, o kitas – statmenai. Statmenojo komponento buvimas sukuria vadinamąją ***Lorenco jėgą***, kuri priverčia dalelę skrieti ratu apie magnetinio lauko linijas. Šio apskritimo plokštuma statmena magnetinio lauko krypčiai, o spindulys, vadinamas ***Larmoro spinduliu***, yra nusakomas priklausomybe

$$r_L = \frac{mv}{eZH\sin\vartheta}c = \frac{v}{c}\cdot\frac{E}{300ZH\sin\vartheta} \approx \frac{A}{Z}\cdot\frac{\varepsilon}{300H\sin\vartheta}; \qquad (6.28)$$

čia r_L – Larmoro spindulys [centimetrais], m – dalelės masė, $v \approx c$ – jos greitis, e (= 1) elektrono (arba protono, pozitrono) elektrinis krūvis, Z ir A – atomo eilės numeris ir masės skaičius, $E = A\varepsilon$ – dalelės visa energija [elektronvoltais], H – magnetinio lauko stipris [erstedais], ϑ – kampas tarp dalelės greičio ir magnetinio lauko jėgų linijų krypčių. Išilgasis greičio komponentas elektringosios dalelės brėžiamą apskritimą ištempia į spiralę, kurios ašis sutampa su magnetine linija (žr. **6.24** pav.).

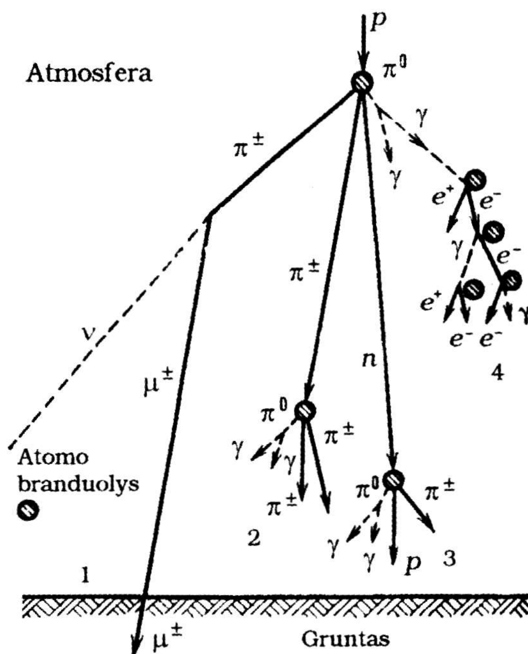
Pasinaudoję (**6.28**) sąryšiu, galime įsitikinti, kad didelių energijų reliatyvistinių dalelių Larmoro spinduliai yra daug didesni už visą Žemės magnetosferą. Todėl šimto GeV dalelės pralekia visą magnetosferą, beveik nepakeitusios savo pirmykštės krypties. Mažiau energingos dalelės truputį iškrypsta iš savojo kelio. Teigiamas daleles Žemės magnetinis laukas kreipia į rytus, neigiamas – į vakarus. Minkštieji kosminiai, o ypač subkosminiai spinduliai dar kreipiami ir į Žemės poliarines sritis. Žemės atmosferą virš pusiaujo pajėgia pasiekti keliolikos GeV daleles. Mažesnių energijų dalelės Žemės atmosferą bombarduoja tik ašigalių rajonuose.



6.24 pav. *Elektringosios dalelės kelias magnetiniame lauke. Spiralės spindulys tuo didesnis, kuo didesnė dalelės energija ir kuo silpnesnis laukas. Spiralės viduje magnetinis srautas lieka pastovus*

6.7.2. Kosminiai spinduliai Žemės atmosferoje

Kosminių spindulių dalelės smogia į Žemės atmosferos molekulėse esančių atomų branduolius ir sukelia branduolines reakcijas. Apšaudytieji branduoliai skyla į įvairius lengvesnių branduolių izotopus, tarp jų ir radioaktyvius, taip pat į protonus bei neutronus. Jei smogia ne protonas, o sunkesnė reliatyvistinė dalelė, tai ji irgi skyla. Branduolinių reakcijų metu randasi ir daug įvairių nestabilių elementariųjų dalelių. Dažniausiai tai pionai, o retkarčiais ir kaonai, hiperonai, rezonansinės dalelės. Gali susidaryti ir antiprotonų bei antineutronų. Visi šie branduolinių reakcijų produktai pasidalija reakciją sukėlusios dalelės energiją ir išlaksto dideliais, dažnai reliatyvistiniais greičiais, tapdami ***antriniais*** kosminiais spinduliais ir sukeldami naujas branduolines reakcijas. Tuo būdu pakankamai didelės energijos ***pirminių*** (dar nedalyvavusių branduolinėse reakcijose Žemės atmosferoje) kosminių spindulių dalelė atmosferoje sukelia didžiulę antrinių kosminių spindulių liūtį. Ypač aktyviai liūtis didina branduolinėse reakcijose susidarę pionai. Jie esti trijų rūšių – neutralieji π^0, teigiamieji π^+ ir neigiamieji π^-.



6.25 pav. *Reliatyvistinio protono sukeltos antrinių kosminių spindulių liūties Žemės atmosferoje dalis. Užbrūkšniuoti skrituliukai – Žemės atmosferos atomų branduoliai. 1 – pionų* π^+ *arba* π^- *skilimo rezultatai, 2 –* $\pi^{\pm}$ *smūgių į atomų branduolius rezultatai, 3 – antrinių neutronų (arba protonų) smūgių rezultatai, 4 –* π^0 *skilimo rezultatai*

Neutralieji pionai yra labai nestabilūs ir per $1{,}78 \cdot 10^{-16}$s virsta dviem didelių energijų gama spindulių fotonais:

$$\pi^0 \to \gamma + \gamma. \qquad (6.29)$$

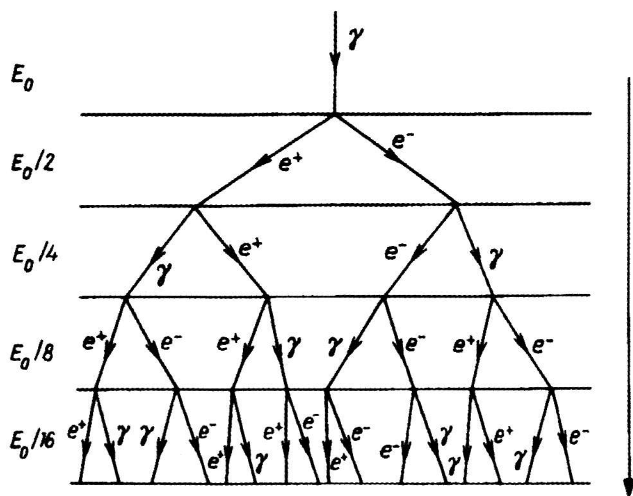
Kiekvienas iš pastarųjų gali atsidurti arti elektringų dalelių ir, veikiamas jų elektrinio lauko, virsti didelių energijų elektrono ir pozitrono pora. Šios dalelės, atsitrenkdamos į atmosferos atomų branduolius, sukuria po naują gama fotoną (***tai stabdomasis spinduliavimas***), o jie vėl gamina elektronų ir pozitronų poras. Taip gali kartotis keletą kartų – kol pakanka energijos kaskart dvigubai ar beveik dvigubai gausėjančioms dalelėms susidaryti. Kai elektronai ir pozitronai galų gale apsilpsta, jie liaujasi didinti antrinių kosminių spindulių liūtį ir imasi jonizuoti oro molekules. Pagaliau pozitronai anihiliuoja su arčiausiai aptiktais elektronais ir vėl pažeria gama fotonus. Tik šį kartą jau mažų energijų, nebepajėgiančius prisidėti prie liūties didinimo.

Teigiamieji ir neigiamieji pionai pakeliui daužo atomų branduolius ir vėl sukelia įvairiausias branduolines reakcijas, panašiai, kaip ir pirminiai kosminiai spinduliai. Taip gali būti vis didinamos antrinių kosminių spindulių liūtys. Dalis teigiamųjų ir neigiamųjų pionų, nespėję smogti į branduolius, vidutiniškai per $2{,}55 \cdot 10^{-8}$ s skyla patys savaime:

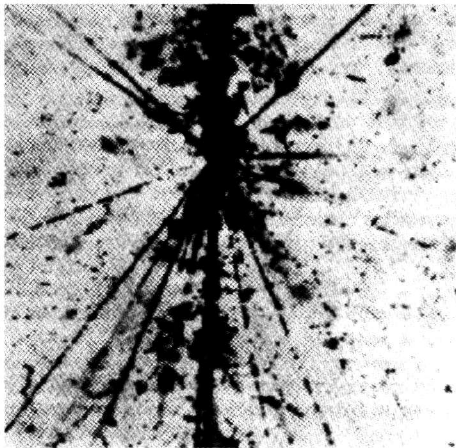
$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{ir} \quad \pi^- \to \mu^- + \overline{\nu_\mu}. \qquad (6.30)$$

Šių reakcijų produktai miuoniniai neutrinai ν_μ ir antineutrinai $\overline{\nu_\mu}$ laisvai, niekur neužkliūdami praeina ne tik per atmosferą, bet ir per visą Žemės rutulį. Miuonai μ^+ ir μ^- naujų branduolinių reakcijų irgi nesukelia. Jie šiek tiek lėtėja, jonizuodami oro molekules. Vidutiniškai per $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ s jie turi suskilti:

$$\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \overline{\nu_\mu} \quad \text{ir} \quad \mu^- \to e^- + \overline{\nu_e} + \nu_\mu. \qquad (6.31)$$



6.26 pav. *Antrinių kosminių spindulių liūtyje atsiradusių gama fotonų veiklos rezultatai*



6.27 pav. *Kosminių spindulių sudėtyje buvusio geležies branduolio susidūrimas su fotografinės plokštelės specialios storasluoksnės emulsijos medžiaga*

Tačiau nemaža jų dalis lekia taip greitai, kad reliatyvistinis jų laiko tėkmės sulėtėjimas (žr. (**6.21**) nejudančio stebėtojo požiūriu dešimtis ar šimtus kartų pailgina jų gyvavimo laiką. Todėl iki suskilimo kai kurie miuonai suspėja ne tik pasiekti Žemės paviršių, bet ir prasiskverbti į vieno kilometro ar dar didesnį gylį. Miuonai sudaro Žemės paviršių jūros lygyje pasiekiančių antrinių kosminių spindulių daugumą. Pirminių kosminių spindulių virtimas antriniais Žemės atmosferoje arba registravimo aparatūroje pavaizduotas **6.25–6.27** pav.

Pirminiai kosminiai spinduliai Žemės paviršiaus beveik nepasiekia. Jie išsieikvoja atmosferoje. Einant gilyn į atmosferą, jų kiekis vis mažėja. O antrinių kosminių spindulių kiekis dėl liūčių susidarymo einant gilyn į atmosferą iš pradžių auga ir savo maksimumą pasiekia maždaug 20 km aukštyje. Leidžiantis dar žemiau, pradeda mažėti ir antrinių kosminių spindulių. Kol pasiekia Žemės paviršių, jų belieka apie 30 kartų mažiau negu pirminių kosminių spindulių viršum atmosferos.

6.7.3. Kosminiai spinduliai galaktikų erdvėse

Kosminių spindulių pasiskirstymą ir judėjimą tarpžvaigždinėje erdvėje valdo galaktikų magnetiniai laukai. Juk elektringosios dalelės spiralėmis skrieja apie magnetinio lauko linijas. Spiralės spindulį kiekvienu momentu nusako (**6.28**) priklausomybė.

Labai apytiksliai sudėtingą mūsų Galaktikos magnetinį lauką galima sumodeliuoti taip, lyg šis susidėtų iš dviejų skirtingų dalių. Viena dalis – tai taisyklingas magnetinis laukas, kurio stipris Galaktikos diske yra $(0{,}5–1{,}5)\cdot 10^{-3}$ A/m, arba 2–20 mikroerstedų (Oe) [magnetinio srauto tankis $(0{,}2–2{,}0)\cdot 10^{-9}$ teslos (T)], o linijos maždaug lygiagretės disko simetrijos plokštumai. Spiralinėse vijose linijos sutankėjusios ir nutįsusios išilgai vijų. Palaipsniui silpnėdamas, šis taisyklingas laukas nusidriekia toli į šonus nuo disko ir apima visą mūsų Galaktikos sferoidą. Antroji dalis – tai labai netaisyklingas magnetinis laukas, susidedantis iš atskirų chaotiškai pasklidusių sustiprėjimų ir susilpnėjimų, taip pat magnetinių linijų krypties pasikeitimų. Ši netaisyklingoji dalis dažnai susijusi su tarpžvaigždinės medžiagos debesimis ir jų grupėmis. Yra ir daug ma-

žesnių matmenų netaisyklingumų. Kai kuriuose sustiprėjimuose netaisyklingosios dalies magnetinio lauko stipris gali būti daug kartų didesnis negu taisyklingosios dalies stipris. Magnetinius laukus turi ir kitos galaktikos.

Magnetinio lauko netaisyklingumai labai iškrikdo kosminių spindulių judėjimą. Dalelės ima blaškytis visokiausiomis kryptimis. Izotropiškai judėdamos, jos užpildo visą savosios galaktikos tūrį. O dėl tos aplinkybės, kad magnetinės linijos galaktikose yra uždaros ir nenutįsta į tarpgalaktinę erdvę, kosminiams spinduliams, išskyrus pačius energingiausius, labai ilgai nepavyksta ištrūkti iš galaktikos tūrio.

Tuo būdu kosminių spindulių dalelės daug kartų įvairiomis kryptimis kerta galaktikos diską, kuriame gausu molekulinių ir difuzinių debesų bei jų aureolių. Smogdamos į šių dujų daleles, kosminių spindulių dalelės sukelia tas pačias branduolines reakcijas kaip ir Žemės atmosferoje. Jos aprašytos **6.7.2** skirsnyje.

Šių reakcijų metu kaip tiktai ir randasi tie pozitronai ir antiprotonai, kuriuos užregistruojame, kai jie patenka į Saulės sistemos vidų. Pakeliui iki mūsų tik dalis jų anihiliuoja atitinkamai su elektronais ar protonais – anihiliacijos tikimybė maža dėl labai didelio jų greičio. Aprašytose reakcijose susidaro ir daug nestabiliųjų dalelių. Tačiau jos toli nenulekia – suskyla į stabilias daleles ir fotonus.

Reliatyvistinė dalelė, perskrosdama net visą mūsų Galaktiką, sutinka milijoną kartų mažiau medžiagos negu sutiktų, jei sugebėtų pralėkti pro visą Žemės atmosferą. Todėl tarpžvaigždinėje medžiagoje nesusidaro tokios galingos antrinių kosminių spindulių liūtys, o pirminiai kosminiai spinduliai mažai tenukenčia.

Kosminiams spinduliams daužant tarpžvaigždinę medžiagą, dalis sunkiųjų ir vidutiniųjų atomų branduolių suskyla į lengvesnius. Todėl kosminių spindulių cheminėje sudėtyje maždaug 100 000 kartų pagausėja (palyginti su žvaigždžių chemine sudėtimi) labai deficitinių Li, Be, B branduolių. Dėl tos pačios priežasties kosminiuose spinduliuose yra palyginti gausu ir tokių retų izotopų kaip sunkusis vandenilis ir lengvasis helis.

Branduolinės fizikos specialistai yra apskaičiavę, kokio storio tarpžvaigždinės medžiagos klodą turi pralėkti kosminiai spinduliai, kad tarp jų atsirastų stebimas Li, Be, B branduolių skaičius: tai aukštis stulpelio, kurio pagrindo plotas 1 cm^2 ir kuriame telpa 5 gramai tarpžvaigždinės medžiagos. O tokiame stulpe, ištiestame net skersai visą mūsų Galaktiką, tebūtų vos 0,001 g medžiagos. Vadinasi, kosminiai spinduliai Galaktikos diską yra perkirtę vidutiniškai 5000 kartų. Tam jie turėjo sugaišti bent 3 milijonus metų. Kadangi didesnę laiko dalį jie būna toli nuo Galaktikos disko, kur tėra tik retos vainikinės dujos, jų amžius pailgėja iki 10^8 metų.

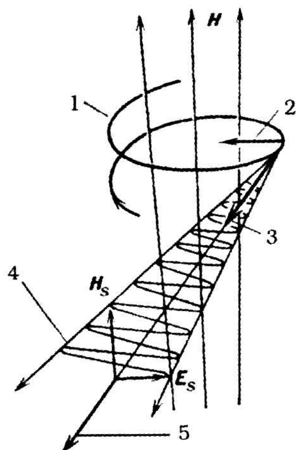
Šie rezultatai gauti tiems kosminių spindulių branduoliams, kurių energija vienam nukleonui $\varepsilon \leq 2{,}5$ GeV. Didesnių energijų branduoliai Galaktikos

diske, matyt, yra išbuvę kiek trumpiau. Pavyzdžiui, branduoliai, kurių $\varepsilon = 100$ GeV, Galaktikos diską yra perskrodę 2000–3000 kartų. Taigi jų amžius jau ne 100, o tik 50 milijonų metų. Tai visiškai suprantama. Juk reliatyvistinių dalelių energija dėl sąveikos su kitomis dalelėmis ir fotonais ilgainiui mažėja. Taip pat kuo didesnė dalelės energija, tuo daugiau galimybių jai nugalėti savosios galaktikos magnetinio lauko spąstus ir ištrūkti į tarpgalaktinę erdvę.

6.7.4. Kosminių spindulių elektronai – elektromagnetinių bangų šaltinis

6.7.4.1. Sinchrotroninis spinduliavimas

Tai dažnai pasitaikantis ***magnetinio stabdomojo spinduliavimo*** atvejis. Ištisinio spektro elektromagnetines bangas skleidžia magnetinio lauko stabdomi reliatyvistiniai elektronai (žinoma, ir pozitronai), spiralėmis skriejantys apie magnetinio lauko jėgų linijas. Kiekvienas toks elektronas siauru kūgiu **savo momentinio greičio kryptimi** spinduliuoja daugybę skirtingų fotonų, kurių virpesių dažniai išplinta į ištisinio spektro intervalą $\Delta\nu \sim E^2$ (E yra visa elektrono energija) (žr. **6.28** pav.). Skleidžiamos energijos maksimumas yra ties dažniu



6.28 pav. *Sinchrotroninio spinduliavimo schema. H – išorinis magnetinis laukas. 1 – elektringosios dalelės trajektorija, 2 – dalelės pagreičio vektorius, 3 – dalelės momentinio greičio vektorius, 4 – sinchrotroninės kilmės elektromagnetinės bangos (jos tiesiai poliarizuotos), 5 – jų sklidimo kryptis, H_S – elektromagnetinių bangų magnetinio lauko vektorius, E_S – elektromagnetinių bangų elektrinio lauko vektorius*

$$\nu_{max} = \frac{eH\sin\vartheta}{4\pi m_0 c}\left(\frac{E}{m_0c^2}\right)^2 = \qquad (\mathbf{6.32})$$
$$= 4{,}6\cdot 10^{-6}\, H\sin\vartheta E^2 [\mathrm{s}^{-1}];$$

čia H yra magnetinio lauko stipris erstedais ($1\ \mathrm{Oe} = 10^3/4\pi\ \mathrm{A{\cdot}m^{-1}}$), E pateikta elektronvoltais.

Žinoma, vienintelis elektronas nepajėgia vienu metu užpildyti fotonais viso jam leisto dažnių intervalo. Tačiau jei įsivaizduosime milijardus elektronų, visiškai vienodai judančių tame pačiame magnetiniame lauke, tai jų visų skleidžiami fotonai sudarys aprašytąjį ištisinį spektrą. Šitokio spinduliavimo galia, apskaičiuota vienam reliatyvistiniam elektronui,

$$P = 3{,}8\cdot 10^{-15}(H\sin\vartheta)^2 E^2 \quad [\mathrm{eV\cdot s^{-1}}]. \qquad (\mathbf{6.33})$$

Reliatyvistinis protonas tame pačiame magnetiniame lauke spinduliuoja $(m_p/m_e)^4 \approx 10^{13}$ kartų silpniau negu tos pačios energijos reliatyvisti-

nis elektronas. Todėl į silpnutį protonų sinchrotroninį spinduliavimą reikia atsižvelgti tik ypač stiprių magnetinių laukų atveju, pavyzdžiui, neutroninių žvaigždžių artimoje aplinkoje.

Realūs sinchrotroniniai šaltiniai yra sudaryti iš skirtingos energijos reliatyvistinių elektronų. Todėl tokių šaltinių skleidžiamų elektromagnetinių bangų energija pasiskirsto daug ilgesniame spektro intervale negu vienodos energijos elektronų atveju. Sinchrotroninės prigimties spinduliuotės energijos pasiskirstymo pagal bangų ilgius pobūdį lemia elektronų skaičiaus pasiskirstymo pagal jų energiją pobūdis. Kosminių spindulių dalelių, tarp jų ir elektronų skaičiaus priklausomybę nuo jų energijos nusako (**6.27**) dėsnis. Juo remiantis ir tarus, kad reliatyvistinių elektronų greičių kryptys magnetinio lauko atžvilgiu yra labai įvairios ir atsitiktinės, teoriškai gaunama ši formulė, nusakanti įvairių kosminių šaltinių sinchrotroninį spinduliavimą

$$j_\nu = a(\gamma)K_e \frac{e^3 H \sin\vartheta}{m_0 c^2}\left(\frac{3eH\sin\vartheta}{4\pi m_0^3 c^5}\cdot\frac{1}{\nu}\right)^{(\gamma-1)/2} = \\ = ka(\gamma)K_e(H\sin\vartheta)^{(\gamma+1)/2}\nu^{-(\gamma-1)/2}. \qquad (\mathbf{6.34})$$

Čia j_ν yra ***sinchrotroninio spinduliavimo koefincientas*** (vienetinio tūrio per vienetinį laiką į vienetinį erdvinį kampą skleidžiama energija, apskaičiuota vienetiniam dažnių ν intervalui), $a(\gamma)$ – specialus koeficientas, šiek tiek priklausntis nuo laipsnio rodiklio γ, K_e – konstanta iš (**6.27**), priklausanti nuo reliatyvistinių elektronų koncentracijos, k proporcingumo koeficientas:

$$k = e^3/(m_0c^2)[3e/(4\pi m_0^3c^5)]^{(\gamma-1)/2}.$$

Jei tiriamajame sinchrotroninio spinduliavimo šaltinyje reliatyvistinių elektronų koncentracija yra visur vienoda, taip pat jei ji nėra per didelė ir dėl to šis šaltinis yra skaidrus savo paties skleidžiamoms elektromagnetinėms bangoms, tai šaltinio energinio skaisčio spektrinis tankis

$$B_\nu = lj_\nu. \qquad (\mathbf{6.35})$$

Čia l yra šaltinio storis išilgai regėjimo spindulio.

Į (**6.35**) įrašę j_ν išraišką iš (**6.34**), gauname ***sinchrotroninio spinduliavimo dėsnį***, nusakantį B_ν priklausomybę nuo magnetinio lauko stiprio ir nuo elektromagnetinių virpesių dažnio:

$$B_\nu = kK_e(H\sin\vartheta)^{(\gamma+1)/2}\nu^{-\alpha}, \qquad (\mathbf{6.36})$$

čia $\alpha = (\gamma - 1)/2$ yra vadinamasis ***sinchrotroninio spinduliavimo spektrinis indeksas***. Matome, kad sinchrotroninio spinduliavimo šaltinio skleidžiamos energijos pasiskirstymo pagal dažnius kreivės yra **rodiklinio pobūdžio**. Išlogaritmavę (**6.36**), gauname

$$\lg B_\nu = \lg k + \lg K_e + (\gamma+1)/2\lg(H\sin\vartheta) - \alpha\lg\nu \qquad (\mathbf{6.37})$$

arba (pasinaudojus (**6.6**) sąryšiu)

$$\lg J_\nu = \lg \omega + \lg k + \lg K_e + (\gamma+1)/2 \lg(H \sin\vartheta) - \alpha \lg \nu. \quad (6.38)$$

(**6.37**) ir (**6.38**) yra tiesių lygtys. Vadinasi, $\lg B_\nu$ arba $\lg J_\nu$ priklausomybės nuo $\lg\nu$ grafikuose sinchrotroninių šaltinių energijos kreivės yra tiesės, didėjant ν, įstrižai smingančios žemyn.

Tačiau per visą elektromagnetinių bangų skalę vieninga tiesė eitų tik tuo *atveju, jei visame nagrinėjamojo sinchrotroninio spinduolio tūryje būtų vienodo stiprio ir vienodai orientuotas magnetinis laukas, vienoda reliatyvistinių elektronų koncentracija, vienoda ir visuose energijos diapazonuose pastovi šių elektronų skaičiaus priklausomybė nuo energijos.* Kitaip sakant, (**6.37**) ir (**6.38**) sąryšiuose H, ϑ, γ, K_e vertės būtų griežtos konstantos ir nepriklausytų nei nuo vietos, nei nuo ν. Tikrovėje bent dalis šių sąlygų lieka neįvykdyta. Todėl skirtinguose ν intervaluose atsiranda skirtingo aukščio ir skirtingo polinkio tiesių arba beveik tiesių atkarpos.

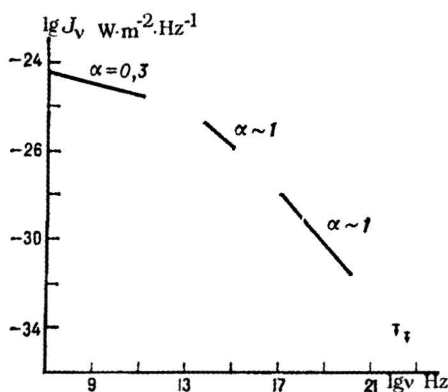
Kaip matome iš (**6.34**)–(**6.38**) sąryšių, sinchrotroninio spinduliavimo galia ir spektro diapazono ilgis priklauso ne tik **nuo reliatyvistinių elektronų gausumo, jų energijos didumo**, bet ir **nuo magnetinio lauko stiprio.** Kuo stipresnis laukas, tuo daugiau stabdomi elektronai, taigi tuo galingiau toks šaltinis spinduliuoja, tuo aukščiau yra $\lg B_\nu$ priklausomybės nuo $\lg\nu$ tiesė (ar kelių beveik tiesių atkarpos) ir tuo toliau ji nutįsta į trumpesnių elektromagnetinių bangų sritį, kol pagaliau nusileidžia iki nulio.

Sinchrotroninio spinduliavimo šaltinių Visatoje yra labai daug ir labai įvairių. Visų pirma toks spinduolis yra visas mūsų Galaktikos tūris. Jis skleidžia maždaug 30 m–30 μm ilgio sinchrotroninės kilmės ištisinio spektro radijo bangas ir tolimuosius IR spindulius. Šie fotonai pas mus atskrieja iš viso dangaus. Didžiausias skaisčio spektrinis tankis B_ν būdingas Šaulio žvaigždynui, kurio link yra mūsų Galaktikos centras. Silpniausiai spinduliuoja nuo Paukščių Tako tolimos dangaus vietos. Tarus, kad $H\sin\vartheta = 3\cdot10^{-6}$ Oe ((2–3)$\cdot10^{-4}$ A/m), iš (**6.32**) sąryšio galima spręsti, jog 30 m ilgio radijo bangų fotonų daugumą sukuria 1 GeV energijos elektronai, o 30 μm ilgio IR fotonų daugumą – 10^{12} eV energijos elektronai. Vadinasi, dar energingesnių elektronų, kurie turėtų spinduliuoti dar trumpesnes bangas, mūsų Galaktikoje yra taip mažai, kad jų silpna spinduliuotė lieka nesusekta.

Dešimtis, šimtus ar tūkstančius kartų stipresnis magnetinis laukas esti supernovų likučių ūkuose, jau minėtuose **6.6.1** skirsnyje. Čia gausiau ir didelių energijų elektronų. Todėl šie ūkai viso dangaus spinduliuojamame silpname radijo bangų fone išsiskiria kaip daug didesnio skaisčio sinchrotroninės kilmės šaltiniai, kurių ištisinis spektras tęsiasi ne tik per radijo bangų sritį, bet silpnėdamas užgriebia bent dalį arba ir visą IR spindulių diapazoną.

Krabo ūko sinchrotroninės kilmės ištisinis spektras (žr. **6.29** pav.) nusidriekia dar daug toliau trumpųjų bangų link, pasiekdamas net minkštųjų gama spindulių sritį. Prisiminkime, kad Krabo ūkas, matomas Tauro žvaigždy-

ne ir žymimas M1 – tai 1054 m. sprogusios II tipo supernovos likučiai, gaubiantys vietoje supernovos dabar ten esantį pulsarą, žymimą NP 0532. Per Rentgeno spindulių sritį nusitęsia ir 1181 m. sprogusios II tipo supernovos likučių Kasiopėjoje, žymimų 3C 58, sinchrotroninės kilmės ištisinis spektras. Tačiau tarpžvaigždinės dulkelės mums užstoja šio spektro optinę dalį. Krabo ūke magnetinio lauko stipris yra 0,1 A/m (10^{-3} Oe). (**6.32**) sąryšis rodo, kad tokiame palyginti nesilpname lauke 10^{11}–10^{12} eV energijos elektronai skleidžia optinio diapazono fotonus, ten gausiai esantys dar didesnių energijų elektronai – Rentgeno ir minkštuosius gama fotonus.



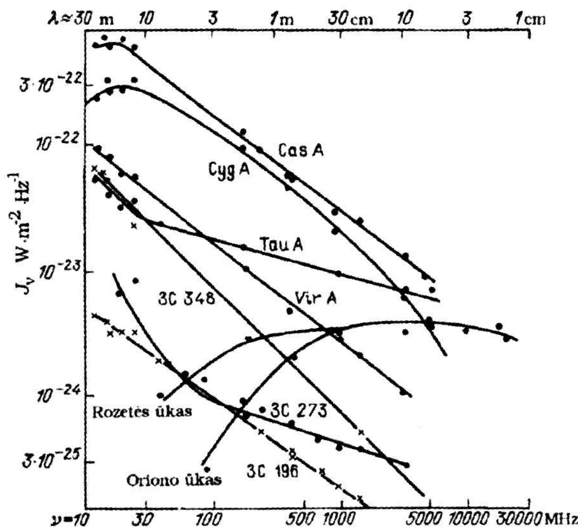
6.29 pav. *Krabo ūko sinchrotroninės kilmės ištisinio spektro energijos kreivė. Į dešinę atidėtas hercais įvertinto elektromagnetinių virpesių dažnio ν logaritmas, į viršų – vatais į m² įvertinto spindesio spektrinio tankio J_ν logaritmas. Krabo ūkas, žymimas M1, yra 1054 m. Tauro žvaigždyne sprogusios supernovos likučių ūkas. Jo nuotrauka yra* **5.45** *pav.*

Silpni sinchrotroninės kilmės radijo bangų šaltiniai yra didžiųjų planetų magnetosferos ir daugelio žvaigždžių išoriniai sluoksniai, ypač kai ten siaučia žybsniai.

Yra žvaigždžių, kurių išoriniuose sluoksniuose ir jų artimiausioje aplinkoje magnetinio lauko stipris siekia tūkstančius ar dešimtis tūkstačių A/m. Tokiuose stipriuose laukuose visi elektronai, kurių $E > 1$ GeV, skleidžia jau Rentgeno srities sinchrotroninius fotonus. Ilgesnių bangų fotonus skleidžia mažesnių energijų elektronai.

O magnetinių baltųjų nykštukių, neutroninių žvaigždžių ir akrecinių diskų aplink juodąsias bedugnes magnetosferose magnetinis laukas vietomis tiesiog superstiprus – 10^{10}–10^{16} A/m (magnetinė indukcija 10^{6}–10^{12} teslų). Jei į tokį lauką patenka reliatyvistiniai elektronai, tai jie tučtuojau gamina gama diapazono sinchrotroninius fotonus. Tačiau po mažos sekundės dalies superstiprus magnetinis laukas juos priverčia skrieti nebe spiralėmis apie lauko linijas, bet tiesiog beveik tiksliai išilgai linijų. Dėl lauko linijų kreivumo jie vis tiek juda su pagreičiu, yra stabdomi ir dėl to spinduliuoja, tačiau jau nebe sinchrotroninio, o kito giminingo būdo pagalba. Tai vadinamasis ***kreivinis*** arba ***magnetodreifinis*** spinduliavimas, irgi priklausantis magnetinio stabdomojo spinduliavimo kategorijai. Manoma, kad kreivinio spinduliavimo mechanizmas sukuria tuos Rentgeno ir gama fotonus, kuriuos skleidžia kai kurie jauni radijo pulsarai.

Daugelyje galaktikų sinchrotroninių spindulių šaltiniai yra panašūs į mūsiškius.



6.30 pav. *Sinchrotroninės ir šiluminės kilmės radijo bangų šaltinių energijos kreivių palyginimas. Rozetės ir Oriono ūkai yra šiluminės kilmės radijo bangų šaltiniai. Spinduliuoja nereliatyvistiniai elektronai atlikdami laisvuosius šuolius. Visi kiti čia pavaizduoti objektai skleidžia sinchrotroninės kilmės fotonus*

O galaktikos su aktyviais branduoliais yra kur kas galingesni ir įvairesni sinchrotroniniai spinduoliai. Tokioms galaktikoms skirtas **8.4** poskyris.

Jei reliatyvistinių elektronų koncentracija yra labai didelė, reikia atsižvelgti ne tik į jų gebėjimą sukurti sinchrotroninės kilmės fotonus, bet ir juos sugerti. Tai vadinamoji ***savoji sugertis***. Sinchrotroninio mechanizmo spinduliavimo ir sugerties koeficientų santykis

$$\frac{j_\nu}{\kappa_\nu} \sim b(\gamma)\sqrt{\frac{\nu^5}{H \sin\vartheta}}, \qquad (\mathbf{6.39})$$

čia $b(\gamma)$ yra specialus koeficientas, priklausantis nuo laipsnio rodiklio γ (**6.27**) dėsnyje. Matome, kad savoji sugertis gali pastebimai susilpninti sinchrotroninio spektro ilgabangę dalį, labiausiai centimetrines, o ypač metrines bei dar ilgesnes radijo bangas. Kuo stipresnis magnetinis laukas, tuo labiau jaučiama savoji sugertis.

Radijo bangas gali daug susilpninti ir didelio tankio nereliatyvistinių jonizuotų dujų debesys, jei jie gaubia stiprų sinchrotroninį radijo šaltinį. Čia sugeria elektronai, atlikdami laisvuosius šuolius. O jei nereliatyvistinių elektronų yra gausu ir pačiame sinchrotroniniame šaltinyje, tai jie labai sutrikdo mažesnės energijos reliatyvistinių elektronų spinduliavimą.

Dėl visų šių priežasčių kai kurių sinchrotroninių šaltinių energijos kreivės, einant ilgųjų bangų link, keliolikos ar kelių dešimčių metrų ilgio radijo bangų diapazone nustoja kilti ir nulinksta žemyn (žr. (**6.30**) ir (**8.35**) pav.).

Jei magnetinio lauko linijos nėra chaotiškos ir visiškai susipynusios, sinchrotroninio spinduolio galia labai priklauso nuo jo skleidžiamų elektromagnetinių bangų sklidimo krypties. Juk stipriausiai spinduliuoja tie elektronai, kurių greičiai labiausiai statmeni magnetiniam laukui. Tai matyti, pavyzdžiui, ir iš (**6.33**) sąryšio. Kuo labiau elektrono greičio kryptis sutampa su magnetinio lauko kryptimi, tuo silpniau toks elektronas yra stabdomas, vadinasi, tuo silpniau jis spinduliuoja. O sinchrotroniniai spinduliai pažeriami elektrono momentinio greičio kryptimi. Vadinasi, **jų daugiausia sklinda statmenai magnetinio lauko ir praktiškai visiškai nesklinda išilgai**. Tai rodo ir (**6.34**) formulė. Taigi sinchrotroniniai šaltiniai, turintys tvarkingą magnetinį lauką, kurio linijos nukreiptos arba tiksliai į Žemę arba tolyn nuo Žemės, mūsų aparatūrai yra neprieinami. Šių šaltinių spinduliai į Žemę nepataiko.

Sinchrotroninės kilmės elektromagnetinės bangos yra ***tieisiai poliarizuotos***. Jų elektrinis vektorius lieka elektrono orbitos plokštumoje (žr. **6.26** pav.). Jei magnetinis laukas yra tvarkingas, taip pat jei elektronai vienodai bando lėkti įvairiausiomis kryptimis ir jų skaičiaus priklausomybę nuo energijos nusako (**6.27**) dėsnis, tai mūsų registruojamų spindulių poliarizacijos laipsnis

$$\pi = \frac{\gamma+1}{\gamma+7/3}. \qquad (\mathbf{6.40})$$

Jei $\gamma = 3$, tai $\pi = 75\%$. Kai magnetinis laukas ne visai tvarkingas, poliarizacijos laipsnis mažesnis. Jei magnetinis laukas visiškai chaotiškas, poliarizacijos nebelieka.

6.7.4.2. Atvirkštinis Komptono reiškinys

Tai didelės energijos elektronų sukelta mažesnės energijos fotonų ***sklaida***, kartu ***dalį elektronų energijos perduodant fotonams***. Fotonų energija padidėja maždaug tiek kartų, kiek kartų juos sklaidančių elektronų visa energija didesnė už jų pačių rimties energiją.

Pavyzdžiui, vykstan šiam reiškiniui reliatyvistiniai maždaug 1 GeV energijos elektronai keleto metrų ir centimetrų ilgio radijo bangų fotonus paverčia optiniais fotonais, kelių mm ir milimetro dalių ilgio radijo bangų fotonus – Rentgeno fotonais, o IR fotonus – gama fotonais. O jei fotonus sklaido 10^{12} eV energijos elektronai, tai gama fotonais pavirsta net milimetriniai radijo fotonai.

O tokie patys 10^{12} eV elektronai, judėdami 10^{-3} A/m stiprio magnetiniame lauke, sinchrotroninio spinduliavimo būdu sukuria vos optinius fotonus. Kad galėtų šitokiame magnetiniame lauke spinduliuoti sinchrotroninės kilmės gama fotonus, elektronas privalo turėti net 10^{16} eV energiją. Tokių ultrareliatyvistinių elektronų pasitaiko nepaprastai retai.

Matome, kad atvirkštinis Komptono reiškinys gali labai efektyviai, daug efektyviau už sinchrotroninį spinduliavimą sukurti ar bent labai sustiprinti

UV, Rentgeno ir minkštųjų gama spindulių šaltinius. Tačiau reikia, kad būtų pakankamai didelė tiek sklaidomųjų fotonų, tiek juos sklaidančių reliatyvistinių elektronų koncentracija.

Milimetro dalių, milimetrų ir centimetrų ilgio radijo bangų fotonų tikrai visur gausu – bet kurioje Mūsų Visatos vietoje viename m^3 kiekvienu momentu galima užklupti $4 \cdot 10^8$ tokių fotonų. Tai vadinamieji ***reliktiniai fotonai***, aprašyti **9.5** poskyryje.

Galaktikų magnetiniuose spąstuose sulaikyti reliatyvistiniai elektronai, paveiti atvirkštinio Komptono reiškinio, šių radijo fotonų nedidelę dalį paverčia daugiausia UV ir Rentgeno fotonais. Dėl to šiuos trumpabangius spindulius turėtų skleisti ištisi galaktikų tūriai. Tačiau tai būdinga tik daliai radijo kvazarų ir radijo galaktikų (žr. **8.4** poskyrį). O daugumoje paprastų galaktikų, tarp jų ir mūsiškėje, kosminių spindulių koncentracija yra aiškiai per maža – viso galaktikos tūrio nešiluminės kilmės silpnas trumpabangis švytėjimas lieka nepastebėtas. Jis tampa reikšmingas tik lokaliniuose kosminių spindulių telkiniuose.

Reliktinių fotonų ištisinis spektras, einant metrinių radijo bangų link, labai nusilpsta (žr. **9.8** pav.), šitokių fotonų lieka visiškai mažai. Daug daugiau metrinių radijo fotonų pagamina tokie galingi sinchrotroniniai spinduoliai kaip radijo kvazarai ir radijo galaktikos. Kai kuriose šių objektų vietose tik ką sinchrotroninio spinduliavimo būdu sukurtus metrinių radijo bangų fotonus kiti skriejantys reliatyvistiniai elektronai atvirkštinio Komptono reiškinio būdu tuojau paverčia optiniais fotonais.

Atvirkštinio Komptono reiškinio suformuotas ištisinis spektras irgi yra rodiklinio pobūdžio kaip ir sinchrotroninės spinduliuotės spektras ($\lg J_\nu$ tiesiškai mažėja, didėjant $\lg\nu$). Juk spektro išvaizdą lemia tas pats (**6.27**) dėsnis.

6.7.4.3. Reliatyvistinių elektronų stabdomasis spinduliavimas

Jau kalbėjome, kad karštuose žvaigždžių vainikuose, tarpžvaigždinės medžiagos vainikinėse dujose, kai kuriuose supernovų likučių ūkuose, kur plazmos kinetinė temperatūra didesnė negu milijonas laipsnių, dideliais šiluminiais greičiais besiblaškantys elektronai, sąveikaudami su protonais ar sunkesnių atomų branduoliais (paprasčiau galima sakyti: atsitrenkdami į branduolius), staiga praranda didelę dalį savo kinetinės energijos, kuri virsta naujai atsiradusių įvairių, daugiausia Rentgeno fotonų energija. Taip vyksta vadinamasis ***stabdomasis spinduliavimas***.

Reliatyvistiniai elektronai, atsitrenkdami į pakeliui užkluptų nereliatyvistinių, pakankamai didelės koncentracijos dujų atomų branduolius, stabdomojo spinduliavimo būdu sukuria minkštuosius, o kai kur net ir kietuosius gama fotonus. Šitokios spinduliuotės energijos kreivės taip pat yra rodiklinio pobūdžio.

Reliatyvistiniai protonai irgi gali sukelti stabdomąjį spinduliavimą. Tačiau jis daugiau nei milijoną kartų silpnesnis už tos pačios energijos elektronų stabdomąjį spinduliavimą. Tai lemia didesnė protono masė.

Akivaizdu, kad kosminių spindulių elektronai nepaprastai aktyviai, net trimis būdais savo didžiulę kinetinę energiją verčia fotonų energija patys ją greitai prarasdami. Per kelerius metus ar keletą šimtų metų jie tampa nebepajėgūs sukurti optinių fotonų, per dešimtis tūkstančių ar milijonus metų – radijo fotonų. Todėl visiškai suprantama, kodėl tarpžvaigždinėje medžiagoje, toli nuo elektringų dalelių greitinimo vietų, kosminių spindulių sudėtyje elektronų yra apie 100 kartų mažiau negu protonų. Elektronai ir protonai greitinami maždaug vienodais kiekiais, o gautąją energiją praranda labai nevienodai.

6.7.5. Kosminių spindulių protonų ir sunkesnių branduolių indėlis spinduliuojant gama fotonus

Šios dalelės, smogdamos į tarpžvaigždinės medžiagos protonus ir kitus atomų branduolius, sukelia įvairias branduolines reakcijas, jau aprašytas **6.7.2** skirsnyje. Jų metu atsiranda ir neutraliųjų pionų π^0, kurie tuojau suskyla į du gama fotonus, pasidalijančius piono rimties ir kinetinę energiją (žr. (**6.29**). Jei vieno smūgio metu susidaro iš karto keli π^0 pionai, tai tik vienas iš jų gauna nemažą dalį smūgiavusios dalelės kinetinės energijos (apie 20%). Kiti neutralieji pionai kinetinės energijos beveik negauna, todėl iš jų atsiradę fotonai pasidalija praktiškai vien tik piono rimties energiją. Jiems atitenka po 67,5 MeV energijos arba truputį daugiau. Skylant energingajam pionui, atsiradusių fotonų energija gali būti daug kartų didesnė. Taip vidutinio kietumo, o iš dalies ir kietųjų gama spindulių srityje susiformuoja ištisinis spektras, kurio rodiklinį pobūdį lemia tas pats kosminių spindulių energetinio spektro dėsnis (**6.27**).

Mažesnių energijų ištisinio spektro gama fotonai randasi anihiliuojant su elektronais įvairaus greičio pozitronams, atsirandantiems veikiant (**6.30**) ir (**6.31**) reakcijoms. O šių reakcijų priežastis – irgi tie patys reliatyvistinių protonų bei sunkesnių branduolių smūgiai. Tačiau šioje spektro srityje jau gausu ir kitų gama fotonų, atsiradusių veikiant reliatyvistiniams elektronams.

Kosminių spindulių smūgių sukeltų branduolinių reakcijų metu dalis branduolių tampa sužadinti. Atsikratydami sužadinimo energijos, jie spinduliuoja daugiausia minkštuosius gama fotonus atskirų emisijos linijų pavidalu.

Kosminių spindulių protonai gama fotonus generuoja ir dar vienu, netiesioginiu būdu. Būtent jie (o taip pat ir reliatyvistiniai elektronai) gali savo smūgiu iki reliatyvistinio greičio pagreitinti lėtus elektronus, pavyzdžiui, esančius atomuose. Šitaip pagreitinti elektronai vadinami ***delta elektronais***. Jie irgi prisideda gausinant minkštuosius gama fotonus.

Didžiausi gama spindulių šaltiniai galaktikose yra tarpžvaigždinės medžiagos telkiniai, kuriuos bombarduoja ir reliatyvistinės teigiamai elektringos dalelės, ir reliatyvistiniai elektronai. Dėl to gama fotonus skleidžia visa Paukščių Tako aplinka. Yra daug diskretinių gama šaltinių. Tai ir galaktikų centrų aplinkos, ir žvaigždžių išoriniai sluoksniai žybsnių metu, ir dalis glaudžių dvinarių žvaigždžių, ir jauni pulsarai, ir kai kurių neutroninių žvaigždžių bei juodųjų bedugnių aplinka, ir kai kurie supernovų likučių ūkai. Daug gama spindulių pažeria sprogdamos novos, ypač supernovos. Galaktikos su aktyviais branduoliais yra daug galingesni gama spinduoliai už paprastąsias galaktikas.

Kosminiai spinduliai yra pagrindiniai Saulės sistemą pasiekiančių gama fotonų gamintojai. Juk masinės medžiagos ir antimedžiagos anihiliacijos, irgi gaminančios gama fotonus, niekur Metagalaktikoje nepastebime. Išorės nepasiekia ir tie gama fotonai, kurie susidaro žvaigždžių gelmėse termobranduolinių reakcijų metu.

Supergalingi gama spindulių žybsniai, mus pasiekiantys iš labai tolimų galaktikų, dar per mažai ištirti. Vyrauja nuomonė, kad juos sukuria ***hipernovų*** sprogimai. Tačiau dar nežinoma nei hipotetinių hipernovų prigimtis, nei supergalingų gama žybsnių sukūrimo mechanizmas. Taigi kol kas lieka nežinomas ir kosminių spindulių indėlio mastas bei mechanizmas sukuriant šiuos žybsnius.

Nepakankamai ištirtas ir ***magnetarų*** (neutroninių žvaigždžių, turinčių ypač stiprų magnetinį lauką) gama žybsnių sukūrimo mechanizmas, nors pastarieji žybsniai ir kur kas silpnesni.

6.7.6. Kaip atsiranda kosminiai spinduliai?

Kiekviena galaktika beveik visus savo kosminius spindulius sukuria pati. Paskui jie dešimtis ir šimtus milijonų metų esti galaktikos viduje, spiralėmis skrieja apie galaktikos magnetinio lauko linijas ir tuo būdu užpildo visą galaktikos tūrį, jame laksto įvairiausiomis kryptimis. Ilgainiui viena kosminių spindulių dalis praranda savo reliatyvistinę energiją arba žūva branduolinėse reakcijose, o kita dalis pagaliau ištrūksta iš galaktikos magnetinių spąstų į tarpgalaktinę erdvę. Šitaip kiekvienos galaktikos kosminių spindulių sudėtis po truputį atsinaujina, greitinamos naujos dalelės.

Kiekvienoje stacionarioje galaktikoje kosminių spindulių energijos tankis turi būti maždaug lygus galaktikos magnetinio lauko energijos tankiui. Kol yra kitaip, kosminių spindulių kiekis galaktikoje arba didėja arba mažėja. Visų vienu metu mūsų Galaktikoje esančių kosminių spindulių energija yra apie 10^{49} J. Kas sekundė Galaktika netenka, bet joje iš naujo atsiranda kos-

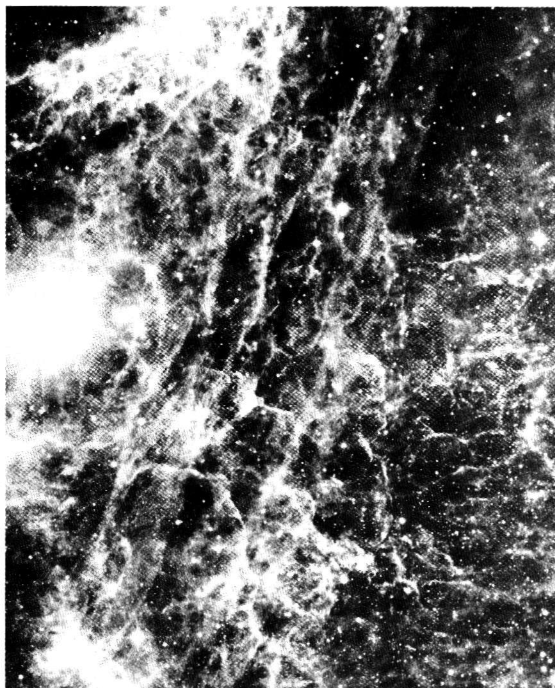
minių spindulių, kurių energija siekia $5 \cdot 10^{33}$ J. Šios energijos 1% sudaro Galaktikos radijo spinduliavimo energiją.

Kaip prisimename, kosminių spindulių šaltinis yra ir mūsų Saulė. Kosminių spindulių gamybos galia joje smarkiai priklauso nuo aktyvumo fazės, tačiau vidutiniškai lygi 10^{18} W. Kitos žvaigždės, kurių mūsų Galaktikoje yra per 300 milijardų, irgi gamina kosminius spindulius. Nors jų gaminimo mastai labai nevienodi, vidutiniškai jie neturėtų daug skirtis nuo Saulės mastų. Taigi visos paprastos žvaigždės pateikia tik dešimttūkstantąją dalį Galaktikos kosminių spindulių. Atrodo, kad dar mažiau kosminių spindulių pagamina planetų magnetosferos.

Labai panašu, kad mūsų Galaktikoje pagrindiniai kosminių spindulių tiekėjai yra **supernovų sprogimai**. Elektringosios dalelės iki kosminiams spinduliams būdingų energijų masiškai greitinamos ne tik pačių sprogimų metu, bet ir vėliau, šių sprogimų sukurtuose supernovų likučių ūkuose. Iki labai didelių energijų daleles greitina neutroninių žvaigždžių, ypač jaunų, magnetosferos, akreciniai diskai aplink juodąsias bedugnes, Galaktikos centro aplinka. Kosminiai spinduliai didesniais ar mažesniais kiekiais atsiranda sprogstant novoms, susidarius stipriems dujų srautams kai kurių kitų glaudžių dvinarių žvaigždžių aplinkoje, formuojantis didelės masės naujoms žvaigždėms. O vadinamosiose galaktikose su aktyviais branduoliais (žr. **8.4** poskyrį) visus čia išvardytus kosminių spindulių šaltinius visiškai nustelbia šių galaktikų centrų aplinka, matyt, ten esantys didžiuliai akreciniai diskai aplink milžiniškas nežvaigždinės kilmės juodąsias bedugnes. Galaktikos su aktyviais branduoliais plazmos daleles greitina ypač dideliais kiekiais ir iki daug didesnių energijos verčių negu paprastos galaktikos.

Taigi plazmos dalelių greitinimas iki reliatyvistinių greičių yra napaprastai universalus fizikos reiškinys. Tik jo mastai ir užmojai labai nevienodi. Dalelės nešiluminiu būdu greitinamos visur, kur tik plazma gauna didžiulę kinetinę energiją, kur vyrauja sudėtingas turbulentinis plazmos judėjimas, o magnetinis laukas yra labai stiprus arba sudėtingos struktūros ir nepastovus. Dalelėms greitinti naudojama kinetinė ir magnetinė energija. Savo ruožtu šių abiejų rūšių energijos šaltiniai yra branduolinės reakcijos žvaigždėse ir gravitacinė energija, išsilaisvinanti ir žvaigždėse, ir galaktikų centrų aplinkose, ir žvaigždėdaros vietose.

Pavyzdžiui, supernovų ir jų likučių ūkų atveju energija plazmos dalelėms nešiluminiu būdu greitinti imama iš sprogimo metu į visas puses nubloškiamų arba po sprogimo toliau besiplečiančių buvusių žvaigždės dujų kinetinės energijos. Neutroninių žvaigždžių atveju energija imama iš neutroninės žvaigždės labai greito sukimosi apie savo ašį kinetinės energijos. Abiem atvejais energijos mainuose tarpininkų vaidmenį vaidina nepaprastai stiprūs magnetiniai laukai. Ir sukimosi apie ašį ir sprogimo kinetinė energija daugiausia gauta iš gravitacinės energijos, kuri milžiniškais kiekiais išsilaisvino gravitacinio



6.31 pav. *Burių supernovos likučių ūko nedidelis fragmentas. Ūko amžius – apie 12 000 metų. Sprogimo ištaškytai buvusiai žvaigždės medžiagai dideliu greičiu užgriuvus pakeliui užtiktą tarpžvaigždinę medžiagą, susidarė labai sudėtinga, sūkuriuota, greitai kintanti besiplečiančio plazmos burbulo struktūra, labai palanki Fermio mechanizmui*

kolapso metu prieš pat supernovos sprogimą susidarant neutroninei žvaigždei. Sprogimo metu išsiskiria ir nemažai branduolinės energijos. Galaktikų branduolių aplinkoje dalelės greitinamos, matyt, irgi iš gravitacinės energijos išteklių aplink juodąją bedugnę.

Fizika tiria daug konkrečių mechanizmų, galinčių elektringąsias daleles pagreitinti iki reliatyvistinių greičių. Tai labai reikšminga fizikos mokslo sritis, reikalaujanti daug pastangų ir daug prisidedanti prie fizikos mokslo raidos. Jau daug kas pasidarė žinoma ir suprantama aiškinantis, kaip konkrečiose Visatos vietose greitinamos įvairių rūšių plazmos dalelės, kaip susiformuoja kosminių spindulių sudėtis, jų energinis spektras. Tačiau neaiškumų ir tiesiog spėlionių dar labai daug. Sprendžiant šiuos labai svarbius klausimus, fizikos mokslo dar laukia didžiulis darbas. Pabandysime visiškai trumpai išvardyti labiausiai tikėtinus ir, matyt, reikšmingiausius greitinimo mechanizmus.

1. Elektringąsias daleles gali efektingai greitinti ***elektriniai laukai***, indukuojami kintančių magnetinių laukų. Bet tik iki to laiko ir vietos, kol lauko suteikiamas pagreitis nėra priešingas dalelės judėjimo krypčiai. Ta pati dale-

lė šitokio trumpalaikio greitinimo sąlygose gali atsidurti daug kartų, tuo būdu vis padidindama savo energiją.

2. Jei magnetinio lauko struktūra pasidaro labai sudėtinga, vietomis visiškai arti vienos kitų atsiduria priešingų krypčių magnetinių jėgų linijos. Plazmos judėjimo tampomos, jos gali susidūrinėti ir naikinti viena kitą. Tai vadinamoji ***magnetinio lauko anihiliacija***. Jos metu dalis magnetinio lauko energijos virsta kitokių rūšių, ypač elektrinių reiškinių energija. Kintantys magnetiniai laukai sukuria 10^9 voltų, o kai kur net 10^{15} voltų ar dar didesnės įtampos elektrovaros jėgą. Palyginti plonu plazmos klodu tarp dviejų priešingo poliškumo magnetinių sienų tekanti elektros srovė napaprastai sustiprėja. Kai ji pasidaro per stipri, tai suskyla į atskirus pluoštus, kurie visaip išsilanksto, susipainioja, vietomis labai suplonėja. Pasklinda labai stiprios įvairiausių rūšių ***magnetohidrodinaminės bangos***. Kai kurios jų virsta ***smūginėmis bangomis***, kurios vietomis plinta vienos priešais kitas ir susiduria. Ir elektros srovės, ir jų sukurtos smūginės bei kai kurios magnetohidrodinaminės bangos greitina dalales iki kosminių spindulių rango. Ypač iki didelių energijų greitina susidurančios smūginės bangos. Turbulentinis plazmos judėjimas irgi generuoja magnetohidrodinamines bei smūgines bangas.

3. Iki labai didelių energijų ir didžiuliais kiekiais daleles gali pagreitinti ir elektromagnetinių bangų srautas, jei kur nors jis yra ypač stiprus, o jame vyrauja gama fotonai.

4. Kai elektringosios dalelės jau yra įgijusios gana didelius pradinius greičius, toliau jas veiksmingai greitina vadinamasis ***statistikinis Fermio mechanizmas***. Šiuo atveju labai greitų dalelių greičiai dar didėja, dalelėms susidūrinėjant su plazmos ir joje „įšalusių“ magnetinio lauko jėgų linijų sutankėjimais („magnetiniais debesimis“), daugiausia atsiradusiais dėl didelio plazmos audringumo, turbulentinių judesių joje. Tai ypač būdinga jauniems supernovų likučių ūkams. Elektringoji dalelė su magnetiniu debesiu susiduria ne mechaniškai – ji atsispindi nuo debesies, veikiama Lorenco jėgos komponento, atsiradusio dalelei bandant veržtis stiprėjančio magnetinio lauko kryptimi. Jei dalelė su tokiu magnetiniu debesiu susiduria kaktomušomis, tai nuo jo atšoka, padidindama savo buvusį greitį, o jei smogia jį pasivydama, tai nuo jo atsispindėdama praranda dalį savo energijos. Susidūrimai kaktomušomis esti dažniau, todėl elektringosios dalelės galų gale pagreitėja. Energijos šaltinis – plazmos sutankėjimų netvarkingų judesių kinetinė energija.

5. Pagreitinti elektringųjų dalelių didelį kiekį, matyt, gali ir labai jaunų neutroninių žvaigždžių magnetosferos. Juk neutroninei žvaigždei nepaprastai greitai sukantis apie savo ašį, kartu sukasi ir jos superstipraus magnetinio lauko jėgų linijos. O su jomis – ir plazmos debesys. Jei apsisukimo periodas lygus 0,01 sekundės, tai už 400–500 km nuo sukimosi ašies linijinis sukimosi greitis darosi artimas šviesos greičiui. Pasiekusios tokį greitį, plazmos dalelės ištrūksta į tarpžvaigždinę erdvę.

7 SKYRIUS

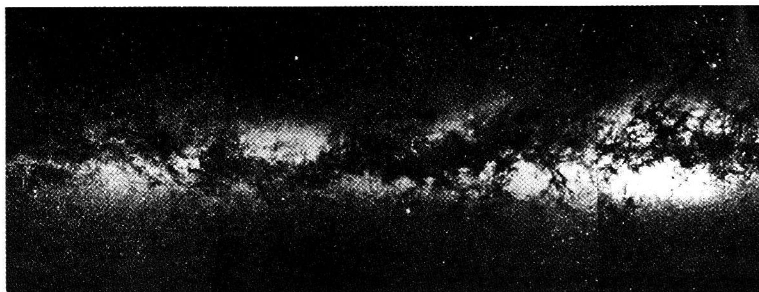
GALAKTIKA

Vytautas Straižys

7.1. PAUKŠČIŲ TAKAS IR GALAKTIKA

Visi pažįsta Paukščių Taką, balzganą juostą, nusidriekusią danguje ir ypač gerai matomą tamsiomis, be Mėnulio naktimis (7.1 pav.). Paukščių Taku lietuviai šią juostą pavadino todėl, kad rudens ir pavasario vakarais ji tęsiasi per visą dangų iš šiaurės rytų pietvakarių link, taigi maždaug sutampa su migruojančių paukščių išskridimo ir parskridimo kryptimi. Su Paukščių, arba Pieno Taku, siejasi daug įvairių tautų mitų. Pirmosios rašytinės žinios apie pastangas moksliškai paaiškinti Paukščių Tako prigimtį pasiekia mus iš senovės Graikijos. Pirmasis dar VI a. prieš Kr. Paukščių Taką teisingai suprato Pitagoras. Jis tvirtino, kad tai yra telkinys labai gausių, bet silpnų žvaigždžių, kurių akis nesugeba įžiūrėti. IV a. prieš Kr. panašių pažiūrų laikėsi Demokritas. Astronomas Kleomedas I a. po Kr. jau pareiškė, kad žvaigždės – tai tolimos saulės. Pasak jo, mūsų Saulė atrodys kaip žvaigždė, jei žiūrėtume į ją iš toli. Pirmasis Paukščių Tako prigimtį įrodė G. Galilėjas savo išrastuoju teleskopu.

Kad Paukščių Takas yra milžiniškos žvaigždžių sistemos projekcija į dan-



7.1 pav. *Paukščių Takas nuo Šaulio (dešinėje) iki Kasiopėjos (kairėje) žvaigždynų. Tolimų Galaktikos disko žvaigždžių švytėjimą dengia įvairios formos juodi dulkių debesys*

gaus sferą, įrodė anglų astronomas Viljamas Heršelis (*W. Herschel*) XVIII amžiuje. Sistemingai tyrinėdamas visą dangų, Heršelis atrado daugiau nei 2500 žvaigždžių spiečių ir įvairios formos ūkų, sudarė pirmuosius jų katalogus. Didelė dalis jo suregistruotų ūkų vėliau pasirodė esančios atskiros galaktikos, nepriklausančios Paukščių Tako sistemai. Remdamasis žvaigždžių skaičiavimais įvairiomis kryptimis, Heršelis sukūrė Paukščių Tako galaktikos modelį, kuris, deja, buvo toli nuo realybės, nes jo atlikti stebėjimai nesiekė žvaigždžių sistemos pakraščių, be to, jis neįtarė, kad žvaigždės, pasiskirsčiusios erdvėje netolygiai, turi nevienodą šviesį ir kad žvaigždžių šviesą sugeria tarpžvaigždinių dulkelių debesys.

Kad Paukščių Tako sistema yra didžiulė galaktika, kurią sudaro šimtai milijardų žvaigždžių, jų spiečių, tarpžvaigždinių dujų ir dulkių ūkų, galutinai buvo įrodyta tik XX a. trečiajame dešimtmetyje. Panašių galaktikų visomis kryptimis matoma didžiulė daugybė, taigi Paukščių Tako galaktika nėra kokia nors išskirtinė Visatoje. Paukščių Tako galaktiką toliau vadinsime ***Galaktika*** (angl. *Galaxy*).

Mūsų Saulė su savo planetomis skrieja aplink Galaktikos centrą, esantį Šaulio žvaigždyno kryptimi ir nutolusį nuo mūsų per 8,5 kiloparsekus (kpc). Galaktikos žvaigždės tankiausiai spiečiasi į sportinio disko formos tūrį. Šio disko skersmuo yra maždaug 30 kpc. Kadangi Saulė yra šio disko viduje, mums atrodo, kad kitos tolimos disko žvaigždės spiečiasi į švytintį ratą – Paukščių Taką, dalijantį dangaus sferą į dvi maždaug lygias dalis. Paukščių Takas yra mūsų Galaktikos disko projekcija į dangaus sferą. Jeigu Galaktikos diske žvaigždės būtų pasiskirsčiusios vienodu erdviniu tankiu ir jei nebūtų šviesos ekstinkcijos (sugerties), Paukščių Takas atrodytų kaip lygi į vidurį šviesėjanti juosta – šviesesnė ten, kur mūsų regėjimo spindulys kerta gilesnę disko erdvę, ir silpnesnė ten, kur disko erdvė trumpesnė. Tačiau diske žvaigždės pasiskirsčiusios nevienodu tankiu, o tarpžvaigždinėje erdvėje yra dulkelių debesų, sugeriančių šviesą. Dėl to Paukščių Takas atrodo kaip šviesi juosta su labai netaisyklingais kontūrais. Jis tęsiasi per dangų tai praplatėdamas, tai susiaurėdamas, tai suskildamas į kelias vagas.

7.2 pav. *Galaktinė koordinačių sistema: O – Saulė, QPQ'P' – dangaus dienovidis, QKQ'K' – dangaus pusiaujas, MKNK' – galaktinis pusiaujas, GABG' – šviesulio A galaktinės platumos apskritimas, P ir P' – dangaus šiaurės ir pietų poliai, G ir G' – galaktiniai šiaurės ir pietų poliai, OC – kryptis į Galaktikos centrą, l – galaktinė ilguma, b – galaktinė platuma, K ir K' – galaktinio pusiaujo sankirtos su dangaus pusiauju taškai*

Šaulio žvaigždyne Paukščių Takas yra plačiausias ir šviesiausias, ten yra ***Galaktikos centras***. Jo 2000 m. epochos pusiaujinės koordinatės yra: $\alpha = 17^h45^m,6$, $\delta = -29°00'$. Priešinga Galaktikos centrui kryptis vadinama ***anticentru*** ir yra ties Vežėjo ir Tauro žvaigždynų riba. Maždaug Paukščių Tako viduriu eina ***galaktikinis pusiaujas***, nuo kurio į abi puses skaičiuojama ***galaktinė platuma*** *b*: pusiaujyje – 0°, šiaurės ir pietų galaktiniuose poliuose +90° ir –90°. Galaktikos šiaurinis polius yra Berenikės Garbanų žvaigždyne (2000 m. epochos koordinatės: $\alpha = 12^h51^m$, $\delta = 27°,1$), o pietinis – Skulptoriaus žvaigždyne ($\alpha = 0^h51^m$, $\delta = -27°,1$). ***Galaktinė ilguma*** *l* matuojama galaktikinio pusiaujo lanku nuo krypties į Galaktikos centrą iki šviesulio galaktinės platumos apskritimo iš vakarų į rytus nuo 0° iki 360°.

Pusiaujinių ir galaktinių koordinačių tarpusavio padėtys parodytos 7.2 pav.

7.2. ŽVAIGŽDŽIŲ NUOTOLIAI

Tiriant Galaktikos struktūrą, būtina žinoti ją sudarančių žvaigždžių, jų spiečių, tarpžvaigždinės medžiagos debesų ir kitų objektų nuotolius.

7.2.1. Trigonometriniai paralaksai

Paprasčiausias nuotolių nustatymo metodas iki žvaigždžių yra jų ***trigonometrinių*** arba ***metinių paralaksų*** (angl. *parallax)* matavimas. Šis metodas jau buvo aprašytas 2.9 poskyryje. Čia pakartosime pagrindinius teiginius.

Dėl Žemės skriejimo orbita aplink Saulę žvaigždės dangaus sferoje brėžia apskritimus, elipses arba tieses – žiūrint kokioje dangaus sferos vietoje ekliptikos atžvilgiu yra žvaigždė. Šio apskritimo skersmuo, elipsės didysis pusašis ar tiesės ilgis, išmatuoti kampiniais vienetais (paprastai kampinėmis sekundėmis) ir padalyti pusiau, vadinami žvaigždės paralaksu π. Tai yra kampas, kuriuo matomas iš žvaigždės didysis Žemės orbitos pusašis – astronominis vienetas (av). Kuo žvaigždė yra arčiau Saulės, tuo jos paralaksas didesnis. Didžiausią metinį paralaksą turi Kentauro Proksima – jis lygus 0,772".

Trigonometriniai paralaksai žvaigždėms, kurių nuotolis >100 pc, yra <0,01" ir iš Žemės paviršiaus dėl atmosferos trukdymų neišmatuojami. Orbitinė observatorija „Hipparcos“ išmatavo paralaksus su 0.001" paklaida. Tai reiškia, kad žvaigždėms, esančioms ties 100 pc, nuotolio paklaida yra 10%, ties 200 pc – 20%. Hablo kosminio teleskopo matavimų tikslumas 2–3 kartus mažesnis, tačiau juo galima pasiekti daug silpnesnes žvaigždes. 2010–2012 m. Europos kosminė agentūra planuoja paleisti orbitinę observatoriją „Gaia“, kuri matuos paralaksus su 0.00001" paklaida. Tuomet nuotoliai bus žinomi 10% tikslumu iki 10 kpc, t. y. toliau nei Galaktikos centras.

7.2.2. Sekuliariniai ir statistiniai paralaksai

Taikant minėtąjį trigonometrinių paralaksų metodą, kaip bazė naudojamas astronominis vienetas, t. y. Žemės orbitos didysis pusašis. Jis apriboja nuotolį, iki kurio dar galima matuoti patikimus paralaksus. Jei šią matavimų bazę padidintume, galėtume gauti tolimesnių žvaigždžių paralaksus. Tam galima panaudoti Saulės (o kartu ir Žemės) judėjimą erdvėje. Judant Saulei, kinta žvaigždžių stebėjimo kampai, todėl išmatavus jų poslinkius dangaus sferoje per 100 metų, galima tikėtis nustatyti jų paralaksus ir nuotolius. Tačiau taip būtų, jei visos žvaigždės, išskyrus Saulę, stovėtų vietoje. Tuomet artimesnės žvaigždės slinktų greičiau, tolimesnės lėčiau, ir poslinkio dydis, vadinamasis ***sekuliarinis*** (lot. *seculum* – amžius) paralaksas, būtų nuotolio funkcija.

Tačiau žvaigždės nestovi vietoje. Prie sekuliarinio paralakso prisideda kitas judėjimas, vadinamas ***pekuliariniu*** (lot. *pecularis* – savitas). Jis atsiranda dėl to, kad žvaigždės, kartu su Saule skriedamos aplink Galaktikos centrą, turi nuosavas šiek tiek skirtingas orbitas. Saulė paveja ir pralenkia vienas žvaigždes, o kitos pamažu lenkia Saulę. Orbitos turi truputį skirtingus ekscentricitetus ir polinkius į Galaktikos disko plokštumą. Dėl šių pekuliarinių judėjimų mes negalime nustatyti pavienės žvaigždės sekuliarinio paralakso, nes nežinome, kokią dalį jos regimajame slinkime sudaro sekuliarinis ir kokią – pekuliarinis judėjimas.

Pekuliarinis žvaigždžių judėjimas Saulės atžvilgiu yra chaotiškas, tačiau pastebėta tam tikrų dėsningumų. Vienas jų yra tai, kad dauguma šviesių (iki 5–6 ryškio) Saulės aplinkoje esančių žvaigždžių juda iš Heraklio žvaigždyne esančio taško, vadinamo ***apeksu*** (angl. *apex*), priešingoje dangaus pusėje Balandžio žvaigždyne esančio ***antiapekso*** kryptimi. Tai reiškia, kad gretimų žvaigždžių atžvilgiu Saulė juda apekso link maždaug 20 km/s greičiu. Tačiau šis žvaigždžių judėjimas iš apekso į antiapeksą aptinkamas tik statistiškai. Atskirai paimta žvaigždė gali judėti ir priešinga kryptimi. Vadinasi, ir Saulės judėjimas apekso link netinka individualių žvaigždžių nuotoliams nustatyti. Tačiau jei imsime ne vieną žvaigždę, o didelę jų grupę, tai jų pekuliariniai chaotiški judėjimai išsilygina duomenų vidurkiuose ir išlieka sekuliarinis tos žvaigždžių grupės paralaksas, vadinamas ***statistiniu***. Tokią žvaigždžių grupę gali sudaryti tam tikros spektrinės klasės ir tam tikro ryškių intervalo žvaigždės, kurių nuotolis nuo Saulės mažai skiriasi.

Statistiniai žvaigždžių grupių paralaksai nustatomi daug tiksliau, jei kartu su žvaigždžių savaisiais judėjimais panaudojami ir jų radialiniai greičiai.

7.2.3. Fotometriniai nuotoliai

Kitas metodas žvaigždžių nuotoliams nustatyti pagrįstas formule **5.25**, pateikta **5.3** poskyryje. Reikia žinoti žvaigždės ryškį V, jos absoliutinį ryškį M_V ir tarpžvaigždinę ekstinkciją A_V (jei ji nelygi nuliui). Žvaigždžių ryškiai V gaunami iš jų fotometrijos, M_V nustatomi arba iš spektro linijų, arba iš energijos pasiskirstymo spektre, arba iš vidurjuostės fotometrijos, o pulsuojančioms žvaigždėms – iš pulsacijos periodo, A_V – iš spalvos eksceso (žvaigždės parausvėjimo). Šis metodas neturi ribų, t. y. galioja bet kokiems nuotoliams. Jo tikslumą apriboja tik į **5.25** formulę įeinančių dydžių paklaidos. Mažiausiu tikslumu nustatomas absoliutinis ryškis M_V, dėl to fotometrinių nuotolių tikslumas būna mažesnis negu 20%.

7.3. ŽVAIGŽDŽIŲ JUDĖJIMAS ERDVĖJE

Kalbėdami apie sekuliarinius ir statistinius paralaksus, turėjome omenyje žvaigždės poslinkį dangaus sferoje dėl stebėtojo vietos kitimo ir dėl pačios žvaigždės pekuliarinio judėjimo. Šis poslinkis vadinamas žvaigždės ***savuoju judėjimu*** (angl. *proper motion*) ir žymimas μ. Žvaigždžių savąjį judėjimą dangumi pirmasis atrado anglų astronomas Edmundas Halis (*E. Haley*) 1718 m., palyginęs savo atliktus Arktūro, Sirijaus ir Prokiono padėčių matavimus su jų padėtimis Ptolemajo kataloge (II a. po Kr.). Greičiausiai dangumi slenka Barnardo žvaigždė, M spektrinės klasės nykštukė, esanti Gyvatnešio žvaigždyne. Per metus ji pasislenka 10,25" arba per 200 m. – kampinį atstumą, lygų regimajam Mėnulio skersmeniui. Artimiausios trinarės žvaigždės Kentauro Alfos savasis judėjimas yra 3,7" per metus. Kuo tolimesnė žvaigždė, tuo lėčiau ji juda. Iš Žemės paviršiaus per 20 m. išmatuojami savieji judėjimai, didesni negu 0,01". Orbitinė observatorija „Hipparcos" išmatavo savuosius judėjimus iki 0,004" per metus.

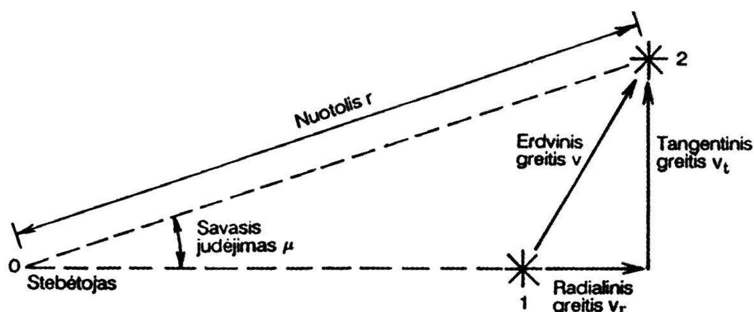
Jei μ_α – žvaigždės judėjimas rektascensijų kryptimi laiko sekundėmis, o μ_δ – žvaigždės judėjimas deklinacijų kryptimi kampo sekundėmis, tai visas savasis judėjimas

$$\mu = \sqrt{(15\mu_\alpha \cos\delta)^2 + \mu_\delta^2}, \qquad (7.1)$$

čia δ – žvaigždės deklinacija.

Jei žinomas žvaigždės nuotolis, iš kampinio judėjimo greičio dangumi galima gauti linijinį greitį erdvėje statmenai regėjimo spinduliui, vadinamąjį ***tangentinį greitį*** km/s:

$$v_t = 4{,}74\mu r; \qquad (7.2)$$



7.3 pav. *Žvaigždės radialinis ir tangentinis greičiai ir savasis judėjimas*

čia μ – savasis judėjimas per metus kampinėmis sekundėmis, *r* – žvaigždės nuotolis parsekais.

Tangentinis greitis yra tik viena tikrojo erdvinio žvaigždės judėjimo dedamoji, statmena regėjimo spinduliui. Kita greičio dedamoji yra regėjimo spindulio kryptimi ir vadinama ***radialiniu greičiu*** (angl. *radial velocity*) (**7.3** pav.). Radialiniai greičiai matuojami pagal Doplerio reiškinį spektro linijoms. Kai žvaigždė juda mūsų link, jos spektro linijos pasislenka į trumpųjų arba violetinių bangų pusę, o kai tolsta – į ilgųjų arba raudonųjų bangų pusę. Poslinkio dydis susijęs su žvaigždės judėjimo greičiu v_r išilgai regėjimo spindulio šitaip:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c}; \qquad (7.3)$$

čia λ yra išmatuotas linijos bangos ilgis žvaigždės spektre, λ_0 – laboratorinis tos linijos bangos ilgis (nejudančio šaltinio), *c* – šviesos greitis.

Prieš nustatant žvaigždės judėjimo greitį Saulės atžvilgiu, reikia atimti Žemės judėjimo greičio orbita radialinę dedamąją tos žvaigždės kryptimi. Susitarta: jei žvaigždė tolsta nuo mūsų, jos radialinis greitis teigiamas, o jei artėja – neigiamas.

Matavimai rodo, kad žvaigždžių radialiniai greičiai labai skirtingi. Nors dauguma žvaigždžių turi mažus greičius, ne didesnius nei ±20 km/s, kai kurios žvaigždės artėja ar tolsta greičiais iki 300 km/s. Radialinių greičių matavimo tikslumas šiuolaikiniais metodais siekia kelis metrus per sekundę.

Kai žinomas žvaigždės tangentinis ir radialinis greičiai, galima apskaičiuoti jos erdvinio judėjimo kryptį ir visą erdvinį greitį Saulės atžvilgiu:

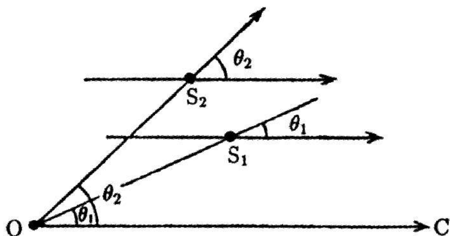
$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}, \qquad \sin\theta = \frac{v_t}{v}; \qquad (7.4)$$

čia θ yra kampas tarp erdvinio greičio ir regėjimo spindulio.

7.4. ŽVAIGŽDŽIŲ SRAUTAI IR KINETINIAI PARALAKSAI

Danguje aptinkamos grupės, kurias sudaro kelios dešimtys ar net šimtai žvaigždžių, judančių viena kryptimi ir tuo pačiu erdviniu greičiu. Jos kartais vadinamos ***žvaigždžių srautais*** arba ***judančiais spiečiais*** (angl. *moving clusters*). Geriausiai ištyrinėta yra kelių šimtų narių žvaigždžių Hiadų grupė Tauro žvaigždyne; į ją įeina Hiadų padrikasis spiečius ir dar dešimtys žvaigždžių aplinkiniame dangaus plote, net iki 20° nuo spiečiaus. Žvaigždžių grupės savieji judėjimai rodo, kad visų jų kryptys sueina į vieną tašką, vadinamą ***verteksu*** (angl. *vertex*).

Žvaigždžių srautai suteikia mums puikią galimybę nustatyti jų nuotolį derinant savuosius judėjimus ir radialinius greičius. Kampinis srauto žvaigždės nuotolis nuo vertekso yra tas pats kampas θ, kurį sudaro žvaigždės judėjimo kryptis su regėjimo spinduliu (7.4 pav.). Žinodami šį kampą, iš (7.4) formulių randame tangentinio ir radialinio greičių sąryšį. Iš spektrų išmatavę radialinį greitį, galime apskaičiuoti tangentinį greitį, o palyginę jį su savuoju judėjimu, gauname žvaigždės nuotolį:



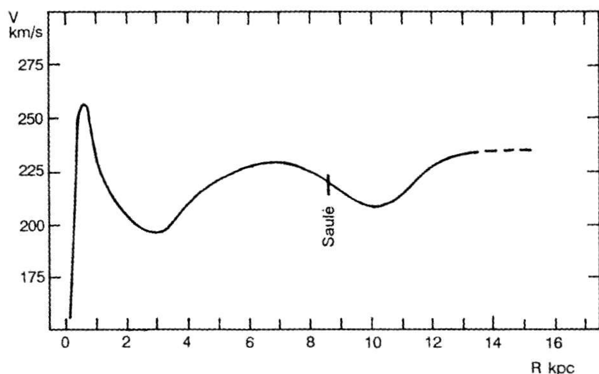
7.4 pav. *Žvaigždžių srauto schema: O – Saulė, S_1 ir S_2 – dvi srauto žvaigždės, OC – vertekso kryptis, θ_1 ir θ_2 – regimieji kampiniai žvaigždžių atstumai nuo vertekso taško*

$$r = \frac{v_r \operatorname{tg} \theta}{4{,}74\mu}. \qquad (7.5)$$

Šis nuotolių nustatymo metodas vadinamas ***kinetinių paralaksų metodu***.

7.5. GALAKTIKOS DISKO SUKIMASIS. ORTO FORMULĖS

Visos Galaktikos disko žvaigždės skrieja aplink Galaktikos centrą maždaug apskritomis orbitomis, kiekvieną nuotolį nuo centro atitinka tam tikras orbitinis greitis, todėl galime kalbėti apie ***Galaktikos sukimosi kreivę***, suprasdami ją kaip priklausomybę tarp linijinio žvaigždžių greičio ir nuotolio nuo Galaktikos centro. Jeigu sukimosi greitis būtų tiesiog proporcingas nuotoliui nuo centro, tai Galaktika suktųsi kaip kietasis kūnas, pavyzdžiui, kaip kompiuterio diskelis. Jeigu visa Galaktikos masė būtų sutelkta jos centre, žvaigždės skrietų aplink šį centrą orbitomis, aprašomomis trečiojo Keplerio



7.5 pav. *Galaktikos sukimosi greičio priklausomybė nuo nuotolio iki centro*

dėsnio, t. y. nuotoliui nuo centro didėjant, skriejimo greitis turėtų smarkiai mažėti. Tačiau Galaktika sukasi nei kaip kietas kūnas, nei kaip Saulės sistema – jos sukimosi kreivė gana sudėtinga (**7.5** pav.). Tolstant nuo Galaktikos centro, sukimosi greitis staigiai auga, kol 500 pc nuotolyje pasiekia 255 km/s. Toliau greitis mažėja iki 195 km/s ties 3 kpc nuotoliu ir vėl didėja, kol pasiekia 230 km/s ties 7 kpc nuotoliu. Nuo čia greitis vėl padeda mažėti iki 210 km/s ties 10 kpc, po to vėl didėja, kol ties disko pakraščiu pasiekia 230–250 km/s. Galaktikos sukimosi kreivė priklauso nuo masės pasiskirstymo diske ir aplink jį.

Olandų astronomas Janas Ortas (*J. Oort*) 1927 m. teoriškai išvedė formules, išreiškiančias žvaigždžių radialinių greičių ir savųjų judėjimų kitimą įvairiose galaktinėse ilgumose dėl Saulės skriejimo aplink Galaktikos centrą:

$$\Delta v_r = Ar \sin 2l \qquad (\mathbf{7.6})$$

$$\Delta \mu_l = \frac{A}{4,74} \cos 2l + \frac{B}{4,74} \; ; \qquad (\mathbf{7.7})$$

čia

$$A = \frac{1}{2}\left[\frac{v_0}{R_0} - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_0}\right] \qquad (\mathbf{7.8})$$

ir

$$B = \frac{1}{2}\left[\frac{v_0}{R_0} + \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R=R_0}\right] \qquad (\mathbf{7.9})$$

yra ***Orto konstantos***, išreikštos km·s^{-1}·kpc^{-1}, o A/4,74 ir B/4,74 – kampinėmis sekundėmis per metus, μ_l – savasis judėjimas išilgai galaktinės ilgumos kampinėmis sekundėmis per metus, r – žvaigždės nuotolis nuo Saulės parsekais, l – galaktinė ilguma, R_0 – Saulės nuotolis nuo Galaktikos disko centro km, v_0 – Saulės skriejimo greitis aplink Galaktikos centrą. Orto formulės galioja bet kokiam nuotoliui nuo Galaktikos centro, tik įvairiems R bus skirtingos Orto konstantų A ir B reikšmės.

Iš formulės (**7.6**) aišku, kad išmatuoti žvaigždžių radialiniai greičiai fiksuotam atstumui nuo Galaktikos centro turi būti dvigubos sinusoidės pavidalo galaktinės ilgumos funkcija. Jei šių žvaigždžių nuotolis žinomas, tai šios sinusoidės amplitudė duoda Orto konstantą A. Pagal formulę (**7.7**) išmatuoti savieji judėjimai yra dviguba sinusoidinė galaktinės ilgumos funkcija, kuri nepriklauso nuo nuotolio iki Saulės. Kreivės amplitudė yra $A/4{,}74$, o vidutinė kreivės reikšmė yra $B/4{,}74$ (kampinėmis sekundėmis).

Orto konstantų suma $A + B$ rodo Galaktikos sukimosi greičio lėtėjimą Saulės nuotolyje nuo Galaktikos centro. $A - B$ rodo kampinį Galaktikos sukimosi greitį Saulės nuotolyje: $\omega_0 = v_0/R_0$. Nors daug kartų bandyta nustatyti Orto konstantas Saulės aplinkoje (iki 1,5 kpc nuotolio), tačiau įvairūs objektai duoda kiek skirtingas jų reikšmes. Dažniausiai pasirenkama $A = 15$ km·s^{-1}·kpc^{-1} ir $B = -10$ km·s^{-1}·kpc^{-1}. Minuso ženklas prie B reikšmės rodo, kad Saulės aplinkoje orbitinio sukimosi greitis lėtėja didėjant R.

Įvairiais metodais nustatytas Saulės aplinkos žvaigždžių orbitinio skriejimo greitis yra 220 km/s. Esant $R_0 = 8{,}5$ kpc, gauname, kad Saulės galaktiniai metai lygūs 230 mln. žemiškųjų metų. Saulės amžius 4,7 mlrd. m., taigi per savo gyvenimą ji apie 20 kartų apskriejo aplink Galaktikos centrą. Šiuo metu Saulė skrieja savo galaktine orbita Gulbės žvaigždyno kryptimi.

7.6. ŽVAIGŽDŽIŲ STATISTIKA

Žvaigždžių pasiskirstymo ir jų erdvinio tankio įvairiose galaktinėse ilgumose ir platumose tyrimai pagrįsti žvaigždžių skaičiavimais ir iš jų sudaroma ***spindesio funkcija***. Skiriamos dvi spindesio funkcijos – ***integralinė ir diferencinė***. Integralinė funkcija $N(m)$ yra skaičius visų žvaigždžių, šviesesnių negu m-asis ryškis viename kvadratiniame laipsnyje. Diferencinė funkcija $A(m)$ yra skaičius žvaigždžių nuo $m - 0{,}5$ iki $m + 0{,}5$ ryškio, t. y. $A(m) = N(m + 0{,}5) - N(m - 0{,}5)$ ir

$$N(m) = \int_{-\infty}^{m} A(m)\, dm\,, \qquad (7.10)$$

čia $A(m) = dN(m)/dm$ yra žvaigždžių skaičiaus $N(m)$ prieaugis ryškiui m pasikeitus vienetu.

Jei erdvė būtų skaidri, o žvaigždės joje būtų pasiskirsčiusios tolygiai, tai santykis $N(m + 1)/N(m) = A(m + 1)/A(m)$ būtų lygus ~4,0. Tai aišku iš to, kad to paties M_V vienu ryškiu silpnesnės žvaigždės yra toliau $\sqrt{2{,}512} \approx 1{,}58$ kartų, o

$$\frac{N(m+1)}{N(m)} = \frac{\frac{4}{3}\pi(1{,}58r)^3}{\frac{4}{3}\pi r^3} \approx 1{,}58^3 \approx 3{,}98.$$

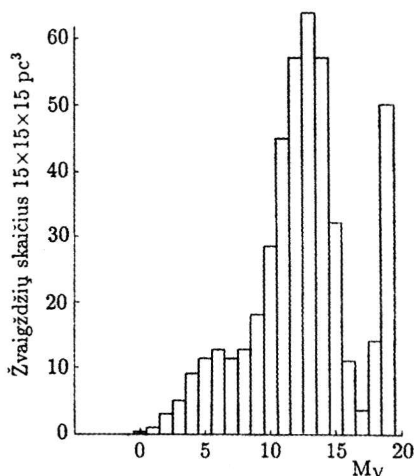
Šis sąryšis yra teisingas bet kokio absoliutinio ryškio žvaigždėms, taigi ir skirtingų absoliutinių ryškių žvaigždžių mišiniui. Tačiau, skaičiuojant žvaigždes įvairiomis kryptimis, gaunama, kad jų skaičius didėja gerokai lėčiau silpnėjant regimajam spindesiui. Galaktikos disko plokštumoje tai įvyksta dėl tarpžvaigždinės šviesos ekstinkcijos, o aukštesnėse galaktinėse platumose – dėl erdvinio žvaigždžių tankio mažėjimo tolstant nuo disko plokštumos. Be to, visomis kryptimis veikia absoliučiai silpnų žvaigždžių (nykštukių) selekcija – dideliuose nuotoliuose jos tiesiog darosi nebematomos. Žvaigždžių spindesio funkcijos naudojamos Galaktikos modeliams apskaičiuoti, tamsiuose dujų ir dulkių mišinio debesyse – tų debesų šviesos ekstinkcijai įvertinti.

Kitas žingsnis, nustatant erdvinį žvaigždžių tankį, yra ***šviesio funkcija*** $\varphi(M)$, rodanti žvaigždžių pasiskirstymą pagal absoliutinius ryškius arba, kitaip tariant, žvaigždžių vienetiniame absoliutinio ryškio intervale ΔM procentą nuo visų žvaigždžių skaičiaus. Šviesio funkcija paprastai nustatoma tūriui, kurio ribose funkcija galima laikyti nekintama. Kartais šviesio funkcija išreiškiama ne santykiniais, o absoliutiniais vienetais, pavyzdžiui, žvaigždžių skaičiumi su šviesiais tarp M ir $M + dM$ kokiame nors tūryje, pavyzdžiui, 1000 pc^3. Tuo atveju turime žvaigždžių ***erdvinio tankio funkciją*** $D(M)$. Jei žvaigždžių erdvinis tankis kinta tolstant nuo Saulės, tada tankio funkciją žymėsime $D(r)$. Nesunku įsitikinti, kad

$$N(m) = \omega \int_0^{\infty} D(r)\, r^2 dr \int_{-\infty}^{m} \varphi(M)\, dM\,; \qquad (7.11)$$

čia ω – erdvinis kampas, apimantis duotąją dangaus aikštelę, $\omega r^2 dr$ – elementarus tūris nuotolyje r.

Tarp artimų Saulei žvaigždžių galima stebėti ir skaičiuoti absoliučiai silpnas žvaigždes, tačiau čia bus mažai arba visai nebus didelio šviesio žvaigždžių. Ir atvirkščiai – dideliuose nuotoliuose matysime tik didelio šviesio žvaigždes, bet neįskaitysime absoliučiai silpnų žvaigždžių. Taigi abiem atvejais bus tam tikra duomenų selekcija, iškraipanti tikrąjį žvaigždžių erdvinį tankį. Selekcijos nebus tik tada, kai skaičiuosime visas žvaigždes ne iki tam tikro ryškio, o iki tam tikro nuotolio. Skaičiuojant žvaigždes iki tam tikro ribinio ryškio, reikia žinoti spindulį sferos, kurios viduje bus įskaitytos visos žvaigždės iki reikiamo absoliutinio



7.6 pav. *Galaktikos disko žvaigždžių šviesio funkcija. Kiekvieno stulpelio aukštis yra žvaigždžių skaičius 15×15×15 pc^3 erdvėje aplink Saulę vieno absoliutinio ryškio intervale*

ryškio. Šviesio funkcija disko žvaigždėms pateikta 7.6 pav. Ordinačių ašyje atidėtas žvaigždžių skaičius kube, kurio kraštinė yra 15 pc, t. y. 3375 pc^3. Kiekvieno stulpelio aukštis reiškia to absoliutinio ryškio žvaigždžių skaičių šiame erdvės tūryje. Matome, kad disko žvaigždžių skaičius sparčiai didėja einant nuo šviesingų prie silpnesnių. Gausiausios yra 12–14 absoliutinio ryškio žvaigždės arba M4–M5 spektrinių klasių nykštukės. Žvaigždžių su $M_V = +3$ (o tai atitinka maždaug F0 V spektrinę klasę) yra 10 kartų mažiau, su $M_V = +0{,}5$ (spektrinė klasė B9 V arba K4 III) yra 100 kartų mažiau, o su $M_V = -1{,}5$ (spektrinė klasė B3 V) yra 1000 kartų mažiau. Pačių karščiausių O–B spektrinių klasių žvaigždžių ir įvairių spektrinių klasių supermilžinių yra mažiau negu raudonųjų nykštukių dešimtis tūkstančių kartų. Baltųjų nykštukių nurodytame tūryje yra maždaug 70.

Susumavę visų klasių žvaigždes, gauname bendrą žvaigždžių skaičių 15 pc dydžio kube – 536. Iš jų 380 yra M nykštukės, 75 F–G–K nykštukės, 70 baltųjų nykštukių ir tik 5 O–B–A pagrindinės sekos žvaigždės ir G–K milžinės.

Mažiausio šviesio žvaigždžių srityje šviesio funkcija rodo jų tankio kritimą pradedant nuo $M_V = 13$. Kritimas tęsiasi iki $M_V = 18$, o toliau tankis tarsi vėl ima didėti, tačiau apie tokias absoliučiai labai silpnas žvaigždes statistiniai duomenys nepakankami.

Tolstant nuo Galaktikos disko plokštumos ir einant nuo Galaktikos centro į periferiją, ***žvaigždžių tankis*** kinta pagal eksponentės dėsnį:

$$D_\mathrm{d}(z,x) = D_\mathrm{d}(R_0)\cdot \mathrm{e}^{-|z|/h}\cdot \mathrm{e}^{-(x-R_0)/d}; \qquad (7.12)$$

čia $D_\mathrm{d}(z,x)$ – disko žvaigždžių tankis nuotolyje x nuo Galaktikos centro, nuotolyje $\pm z$ nuo disko plokštumos, $D_\mathrm{d}(R_0)$ – disko žvaigždžių tankis Saulės aplinkoje, h – disko skalės aukštis, t. y. nuotolis nuo disko plokštumos, kuriame žvaigždžių tankis sumažėja $e = 2{,}72$ kartų, d – disko skalės ilgis, t. y. nuotolis nuo Saulės disko plokštumoje, kuriame žvaigždžių tankis sumažėja e kartų. Paprastai imama $h = 100$ pc O–B–A žvaigždėms ir $h = 325$ pc kitoms žvaigždėms, $d = 3{,}5$ kpc.

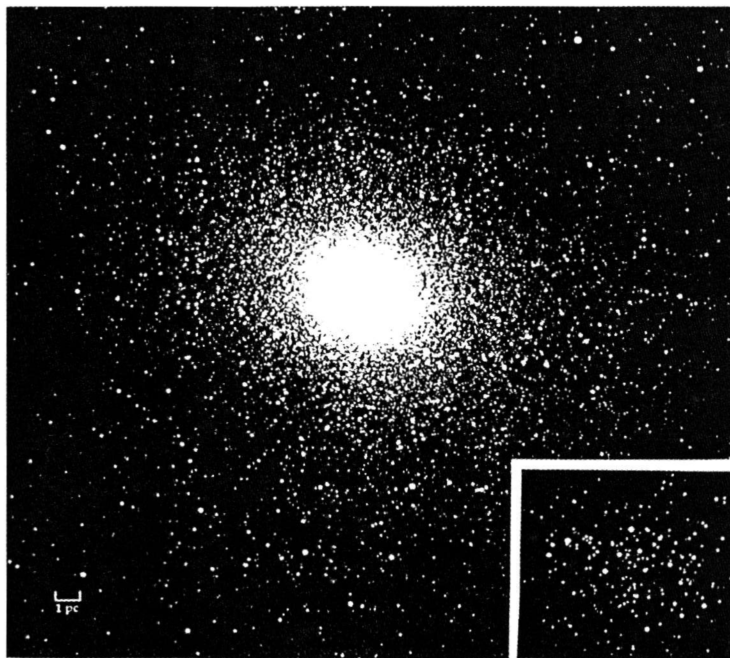
7.7. ŽVAIGŽDŽIŲ SPIEČIAI IR ASOCIACIJOS

Spiečiais vadinamos tarpusavio traukos siejamos erdvinės žvaigždžių grupės, kurių nariai yra bendros kilmės ir raidos, panašaus amžiaus ir cheminės sudėties, drauge skriejantys aplink Galaktikos centrą. Pagal erdvinį žvaigždžių tankį, žvaigždinę sudėtį ir raidos pobūdį spiečiai skirstomi į padrikuosius ir kamuolinius. Padrikuosius spiečius sudaro dešimtys ir šimtai žvaigždžių, o kamuolinius – tūkstančiai, kartais net milijonas žvaigždžių. Padrikųjų spiečių skersmenys yra 2–15 pc, o kamuolinių – 10–50 pc (7.7 pav.).

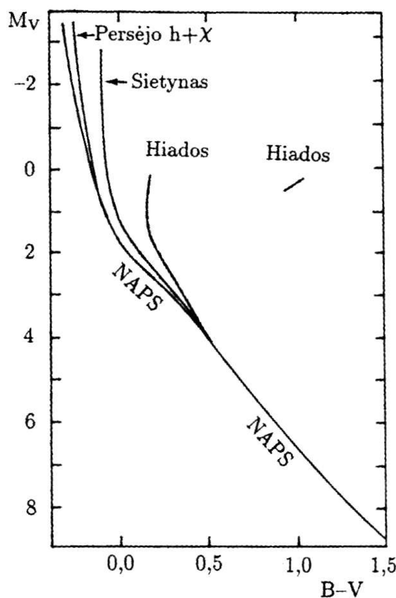
7.7.1. Padrikieji spiečiai

Šios rūšies spiečiai daugiausia telkiasi į Galaktikos diską. Patys jauniausi spiečiai linkę koncentruotis į spiralines vijas: tai būdingi disko populiacijos objektai. Padrikųjų spiečių yra žinoma daugiau kaip 1000. Jų HR diagramas ir raidą jau esame aptarę **5.25** poskyryje. Čia tik prisiminsime, kad padrikųjų spiečių amžiai yra tarp kelių mln. ir 8 mlrd. metų. Jų žvaigždžių metalingumas irgi šiek tiek skirtingas. Paukščių Take dauguma padrikųjų spiečių yra maždaug Saulės cheminės sudėties, o tarp toliau nuo disko plokštumos esančių spiečių pasitaiko tokių, kurių žvaigždės turi beveik 10 kartų mažiau metalų. Tokių spiečių amžiai yra 5–8 mlrd. m., ir jie priklauso senajai disko populiacijai (storajam diskui) – dauguma jų yra vidutinėse ir aukštose galaktinėse platumose.

Padrikųjų spiečių orbitos Galaktikos diske yra panašios į pavienių žvaigždžių orbitas, t. y. maždaug apskritos. Greta bendro skriejimo aplink Galaktikos centrą atskiros spiečiaus žvaigždės gana sudėtingai juda spiečiaus centro atžvilgiu. Šį jų vidinį judėjimą lemia viso spiečiaus gravitacinis potencialas, atskirų žvaigždžių tarpusavio suartėjimai, spiečiaus narių suartėjimai su lauko žvaigždėmis bei dujų ir dulkių debesimis. Kai kurie spiečiaus nariai įgyja hiperbolinius greičius ir visam laikui apleidžia spiečių: taip padrikasis spiečius pamažu irsta.



7.7 pav. *Kamuolinis spiečius M5 ir padrikasis spiečius M67 (kampe)*



7.8 pav. *M_V, $(B-V)_0$ diagrama trims skirtingo amžiaus padrikiesiems spiečiams*

Kaip jau buvo rašyta **5.25** poskyryje, spiečių HR diagramos teikia informacijos apie spiečių amžių, nes, didėjant masei, greitėja žvaigždės raida. Kitas labai svarbus spiečių HR diagramos pritaikymas – jų nuotolio nustatymas. Išmatavus spiečiaus narių ryškius dvispalvėje fotometrinėje sistemoje, gaunama spiečiaus diagrama „regimasis ryškis – spalvos rodiklis", pvz., V, $B-V$. Norint nustatyti spiečiaus nuotolio modulį $V-M_V$, reikia jo pagrindinę seką V_0, $(B-V)_0$ diagramoje sutapdinti su nulinio amžiaus pagrindine seka M_V, $(B-V)_0$ diagramoje (**7.8** pav). Čia $(B-V)_0 = (B-V) - E_{B-V}$ ir $V_0 = V - RE_{B-V}$. Prieš tokį sutapdinimą reikia žinoti spiečiaus spalvos ekscesą E_{B-V}, kad būtų galima iš atskirų jo žvaigždžių spalvos rodiklių ir ryškių atmesti pataisas dėl tarpžvaigždinio parausvėjimo ir ekstinkcijos. Sutapdinant reikia naudoti tik tą spiečiaus pagrindinės sekos dalį, kurios žvaigždės yra bent trim ryškiais silpnesnės negu pačios šviesiausios spiečiaus žvaigždės. Taip daroma todėl, kad šviesiausios spiečiaus žvaigždės paprastai yra nukrypusios aukštyn ir į dešinę nuo nulinio amžiaus pagrindinės sekos, todėl jas sutapdinus su nulinio amžiaus seka M_V, $(B-V)_0$ diagramoje bus gautas neteisingas nuotolio modulis. Antra vertus, labai jaunų spiečių atveju (amžius <1 mln. m.) reikia saugotis ir tų žvaigždžių, kurios yra dar pakeliui į pagrindinę seką. Taip pat reikia atsižvelgti į tai, kad nulinio amžiaus sekos padėtis HR diagramoje šiek tiek priklauso nuo žvaigždžių metalingumo: nemetalingųjų žvaigždžių pagrindinė seka eina šiek tiek žemiau. Taigi, sutapdinant sekas, reikia žinoti ir spiečiaus metalingumą [Fe/H]. Metalingumai gali būti nustatyti arba pagal kelių spiečiaus žvaigždžių cheminę analizę iš spektrų arba pagal spiečiaus F–G klasių žvaigždžių turimą ultravioletinių spindulių perteklių. Laimei, padrikųjų spiečių metalingumai artimi Saulės metalingumui ir vieni nuo kitų nedaug tesiskiria.

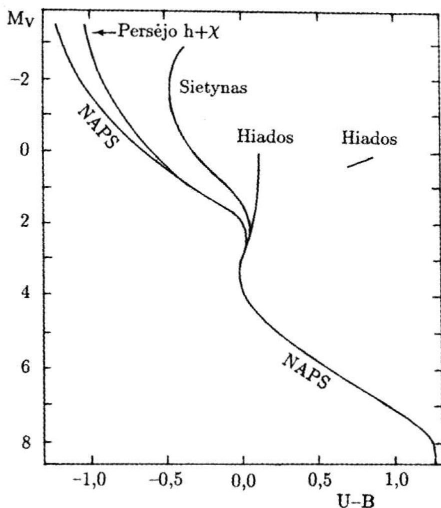
Yra dar viena galimybė – sutapdinti ne V_0, $(B-V)_0$ su M_V, $(B-V)_0$, o V_0, $(U-B)_0$ su M_V, $(U-B)_0$ diagrama. Šiuo atveju pagrindinė seka turi didelį vingį (**7.9** pav.), kuris labai palengvina tikslų sekų sutapdinimą. Kartu nustatomas ir nuotolio modulis $V-M_V$ bei spalvos ekscesas E_{U-B} .

Jei spiečiui tirti taikoma ne *UBV*, o Vilniaus fotometrinė sistema, galima naudoti daug daugiau diagramų „regimasis ryškis – spalvos rodiklis" spiečiaus nuotolio nustatymui, pvz., *V, U–V; V, P–V; V, X–V; V, Y–V* ir *V, V–S*.

Dėl to padidėja nuotolio nustatymo tikslumas. Nustačius spiečiaus nuotolio modulį $V_0 – M_V$, jo nuotolis apskaičiuojamas pagal formulę

$$V_0 - M_V = 5\lg r - 5 .$$

Sutapdinant pagrindines sekas, reikia imti tik žvaigždes, kurios yra spiečiaus nariai vengiant atsitiktinai spiečiaus kryptimi matomų artimojo ar tolimojo fono žvaigždžių. Spiečiaus nariai paprastai atpažįstami pagal panašaus didumo radialinius greičius ar savuosius judėjimus.



7.9 pav. *M_V, $(U–B)_0$ diagrama trims skirtingo amžiaus padrikiesiems spiečiams. NAPS – nulinio amžiaus pagrindinė seka*

Labai svarbi padrikųjų spiečių pritaikymo sritis yra pradinės šviesio funkcijos nustatymas. **7.6** poskyryje pateiktoji Saulės aplinkos šviesio funkcija yra įvairaus amžiaus žvaigždžių erdvinio tankio atspindys. O iš padrikųjų spiečių galima nustatyti pradinę šviesio funkciją, t. y. žvaigždžių pasiskirstymą pagal šviesius (taigi ir pagal mases) iš karto po jų susidarymo. Ši pradinė šviesio funkcija turi gerokai daugiau didelio šviesio (arba didelės masės) pagrindinės sekos žvaigždžių. Kadangi jos evoliucionuoja palyginti greitai, tai jas galime aptikti tik jaunuose spiečiuose.

7.7.2. Žvaigždžių asociacijos ir kompleksai

Jau seniai žinoma karščiausių O–B3 spektrinių klasių žvaigždžių tendencija telktis į grupes. Tokių grupių pavyzdžiai yra šviesių B klasės žvaigždžių grupės Skorpiono ir Kentauro žvaigždynuose, aplink Oriono ūką ir kitur. 1947 m. armėnų astronomas Viktoras Ambarcumianas tokias jaunų žvaigždžių grupes pavadino ***OB asociacijomis*** (angl. *associations*). Šiuo metu žinoma apie 100 tokių grupių. Kiekvienoje jų esti dešimtys O ir B spektrinių klasių žvaigždžių. Būdingi asociacijų dydžiai yra 30–200 pc, taigi jos dešimtį ir daugiau kartų didesnės už padrikuosius spiečius. O spektrinės klasės žvaigždės apie save sudaro švytinčias jonizuoto vandenilio zonas, taigi asociacijose gausu emisinių ūkų.

Kaip ir jauniausi padrikieji spiečiai, OB asociacijos telkiasi į spiralines vijas. Maža to, kai kurie padrikieji spiečiai yra apsupti mažesnio tankio OB asociacijų, taigi yra lyg asociacijų centriniai telkiniai. Pavyzdžiui, tokie yra

jauni spiečiai h+χ Persėjo žvaigždyne, NGC 2244 (Rozetės ūkas) ir NGC 2264 (Kūgio ūkas) Vienaragyje. Netgi jei asociacijos centre ir nėra aiškaus padrikojo spiečiaus, jos tūryje, be OB žvaigždžių, galima rasti ir narių su mažesnėmis masėmis. Tokios žvaigždės sudaro arba pagrindinę seką, arba seką žvaigždžių, kurios yra pakeliui į ją, taigi yra dar gravitacinio traukimosi stadijoje. Tarp tokių žvaigždžių neretai aptinkamos orionidės, jaunos netaisyklingai kintančios žvaigždės (žr. **5.15.4** poskyrį). Jos paprastai dar skendi dujų ir dulkių ūke, iš kurio atsirado. Orionidžių, arba Tauro T rūšies žvaigždžių, grupės kartu su tamsiais debesimis vadinamos ***T asociacijomis***.

Nemaža dalis OB asociacijų yra kartu ir T asociacijos, tačiau kai kurios T asociacijos neturi O ir B žvaigždžių, nes ne visuose dujų ir dulkių debesyse yra sąlygos susidaryti didelės masės žvaigždėms. Dabar žinoma apie 40 T asociacijų, visos jos yra 500 pc spindulio sferoje aplink Saulę. Tolimesnės T asociacijos dar neaptiktos.

Dėl mažo OB ir T asociacijų narių skaičiaus ir didelio užimamo tūrio sunku patikėti, kad jų nariai sudaro gravitaciniu lauku susietą sistemą, nebent asociacijos centre yra padrikasis spiečius. Matyt, tiek didelių, tiek ir mažų masių žvaigždės susidaro tamsiuose debesyse gana toli viena nuo kitos ir ne vienu laiku. Tokių didelės masės prožvaigždžių, kurios dar skendi tamsiame debesyje ir švyti tik infraraudonajame spektro ruože, žinoma gana daug – jos vadinamos ***Beklino objektais*** (Erikas Beklinas, *E. E. Becklin,* JAV astronomas).

Asociacijos dažnai telkiasi į grupes, kurių dydis siekia 600 pc ir net daugiau. Tokie jaunų žvaigždžių susidarymo rajonai kartais vadinami ***žvaigždžių kompleksais***. Galaktikoje jų žinoma apie 40. Kompleksuose matomi dujų ir dulkių ūkai, jauni padrikieji spiečiai, OB ir T asociacijos, emisiniai ūkai, pulsuojančios supermilžinės cefeidės. Tokių kompleksų masė yra nuo 100 000 iki 1 mln. $M_{\odot}$. Tokio komplekso pavyzdys yra vadinamoji ***Guldo juosta****[*] arba ***Vietinė superasociacija*** (angl. *Gould Belt*), į kurią įeina Skorpiono–Kentauro ir Kasiopėjos–Tauro OB ir T asociacijos, penki padrikieji spiečiai (tarp jų Sietynas ir Persėjo Alfos spiečius), Tauro–Vežėjo–Persėjo dulkių debesys. Kompleksas užima beveik 1 kpc skersmens plokščią tūrį, pasvirusį 10–20° kampu į Galaktikos plokštumą (dar žr. **7.10** poskyryje). Kitas gerai žinomas žvaigždėdaros kompleksas yra Oriono žvaigždyne. Tokie kompleksai gerai matomi kitų galaktikų spiralinėse vijose, jie panašūs į švytinčius gniužulus. Kartais tokie kompleksai vadinami ***superasociacijomis***.

* Benjaminas Guldas (*B. A. Gould*) – XIX a. JAV astronomas, pirmasis atradęs šį žvaigždžių sambūrį.

7.7.3. Kamuoliniai spiečiai

Kamuoliniai spiečiai (angl. *globular clusters*) yra būdingi Galaktikos sferoido objektai. Jų pasiskirstymas ir judėjimas Galaktikoje bus aprašyti **7.11** poskyryje. Nors visų kamuolinių spiečių žvaigždės turi sunkiųjų elementų trūkumą ([Fe/H] nuo –0,5 iki –2,5), tačiau tie spiečiai, kurie yra arčiau Galaktikos centro, yra gerokai metalingesni negu tie, kurie yra toli nuo centro. Mažiausiai metalų turi kamuolinis spiečius NGC 5053 ([Fe/H] = –2,5). Nėra nė vieno kamuolinio spiečiaus, kuris turėtų tokį metalų trūkumą, kaip kai kurios pavienės sferoido žvaigždės ([Fe/H iki –4,5). Metalingiausias yra spiečius NGC 6553, esantis netoli Galaktikos centro, jo [Fe/H] = –0,5. Kamuolinių spiečių amžiai, nustatyti pagal pagrindinės sekos posūkio taško padėtį ir teorinius žvaigždžių raidos takus, yra tarp 10 ir 13 mlrd. metų.

Kamuolinių, kaip ir padrikųjų spiečių nuotoliai gali būti nustatomi sutapdinant jų V_0, $(B–V)_0$ diagramas (žr. **5.50** pav.) su M_V, $(B–V)_0$ diagrama prieš tai įskaičius tarpžvaigždinio parausvėjimo ir ekstinkcijos pataisas. Jeigu sutapdinimui naudojama pagrindinė seka, tai itin svarbu atsižvelgti į spiečiaus metalingumą, nes nulinio amžiaus pagrindinė seka nemetalingoms žvaigždėms (subnykštukėms) praeina gerokai žemiau negu Saulės metalingumo žvaigždėms: F–G subnykštukėms pagrindinės sekos poslinkis yra 1,5 ryškio žemyn pagal M_V arba 0,25 ryškio į kairę pagal $B–V$. Antra vertus, pagrindinės sekos padėtį veikia ir helio kiekis – mažėjant helio santykinei gausai, pagrindinė seka HR diagramoje kyla aukštyn. Tačiau helio gausos skirtumai tarp disko ir sferoido žvaigždžių nedideli.

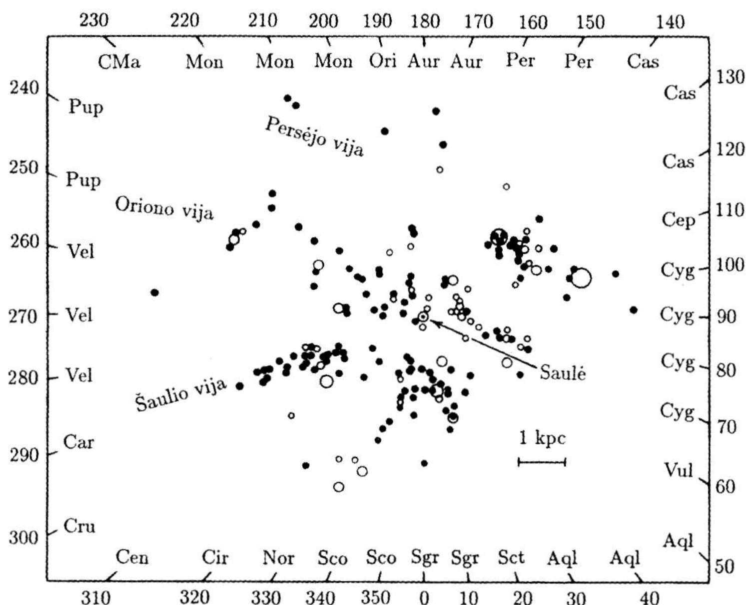
Kamuolinių spiečių submilžinių ir milžinių seka V, $B–V$ diagramoje mažai tinka nuotoliams nustatyti sutapdinimo būdu, nes šios sekos padėtis, statumas ir forma labai priklauso nuo metalingumo. Daug geriau tam tinka horizontalioji seka, ypač jos viduryje esančios pulsuojančios milžinės – lyridės. Kaip patyrėme **5.29.1** poskyryje, visų lyridžių vidutiniai absoliutiniai ryškiai M_V yra tarp 0,0 ir +1,0, šiek tiek priklausydami nuo metalingumo. Jei kamuolinio spiečiaus [Fe/H] žinomas, nesunku rasti jo lyridžių M_V ir, įskaičius tarpžvaigždinę ekstinkciją, nustatyti spiečiaus nuotolio modulį $V_0 - M_V$. Kai kurie metalingiausi kamuoliniai spiečiai visai neturi lyridžių, todėl jų nuotolių nustatymui tenka naudoti pastovaus spindesio horizontaliosios sekos žvaigždes.

Tiriant kamuolinių spiečių žvaigždžių šviesio funkcijas, gaunama informacijos apie įvairių klasių pavienių sferoido žvaigždžių erdvinį tankį. Pačios šviesiausios pagrindinės sekos žvaigždės kamuoliniuose spiečiuose yra ties $M_V = +4$. Tokio absoliutinio ryškio yra F0–F5 spektrinių klasių normalios pagrindinės sekos žvaigždės. Nustatyta, kad pagrindinės sekos žvaigždžių šviesio funkcija priklauso nuo kamuolinio spiečiaus metalingumo. Metalingų spiečių šviesio funkcija savo forma primena pavienių disko žvaigždžių šviesio funkciją. Nemetalinguose spiečiuose stebint vis silpnesnes žvaigždes, jos darosi palyginti daug skaitlingesnės negu Galaktikos diske.

7.8. SPIRALINĖ GALAKTIKOS DISKO STRUKTŪRA

Palyginę mūsų Galaktiką su kitomis galaktikomis, matome, kad ji yra ***spiralinė sistema***. Tai patvirtina Galaktikos paplokštumas ir jos projekcija į dangaus sferą – Paukščių Takas, centrinio žvaigždžių telkinio buvimas (Paukščių Tako praplatėjimas Šaulio ir Skorpiono žvaigždynuose), tarpžvaigždinių dujų ir dulkių debesų gausumas, jaunų žvaigždžių sambūriai Paukščių Take, tvarkingas disko sukimasis aplink centrą.

Galaktikos ***spiralines vijas*** (angl. *spiral arms*) pamatyti nėra lengva, nes Saulė yra disko viduje. Tiriant kitas galaktikas, pastebėta, kad ten į spiralines vijas daugiausia telkiasi didelių masių karštos žvaigždės, supermilžinės, jaunų žvaigždžių asociacijos ir dujų bei dulkių debesys. 1951 m. JAV astronomai Viljamas Morganas (*W. W. Morgan*), Albertas Vitfordas (*A. E. Whitford*) ir Artūras Koudas (*A. D. Code*) ištyrė O ir B spektrinių klasių žvaigždžių pasiskirstymą dangaus šiaurės pusrutulio Paukščių Take iki 5 kpc nuotolio nuo Saulės ir aptiko, kad šios žvaigždės telkiasi į tris pailgas grupes, kurios gali būti spiralinių vijų atkarpos (**7.10** pav.). Vidurinė vija, kurios vidiniame pakraštyje yra Saulė, buvo pavadinta ***Oriono vija***. Ji tęsiasi nuo Gulbės žvaigždyno per Cefėją, Kasiopėją, Persėją ir Orioną Vienaragio kryptimi. Toliau nuo centro esanti vija buvo pavadinta ***Persėjo vija***. Ji eina per Cefėją,



7.10 pav. *Jaunų padrikųjų spiečių (taškai) ir OB asociacijų (skrituliukai) pasiskirstymas Saulės aplinkoje. Ant ašių sužymėtos galaktinės ilgumos ir jas atitinkantys žvaigždynai*

Kasiopėją, Persėją ir Vežėją nutoldama Dvynių kryptimi. Trečioji vija, pavadinta ***Šaulio vija***, yra Galaktikos centro pusėje ir eina daugiausia pietų dangumi per Skydo, Šaulio, Skorpiono, Kampainio, Skriestuvo, Kentauro, Kryžiaus žvaigždynus ir nutolsta Kilio link.

Deja, optiniai spiralinių vijų tyrimai apima tik palyginti nedidelę erdvę aplink Saulę. Tolimesnės Galaktikos sritys Paukščių Take užtemdytos tarpžvaigždinių dulkių debesų. Tačiau jei tų debesų ir nebūtų, optiniai tyrimai negalėtų duoti spiralinių vijų vaizdo toliau negu Galaktikos centras. Mat, nustatant O ir B klasių žvaigždžių nuotolį fotometriniu ir spektriniu būdu, gaunamos maždaug 20% paklaidos. Tai reiškia, kad ties 8 kpc nuotoliu paklaida bus ±1,6 kpc. Tokiu mažu tikslumu nustatę žvaigždžių nuotolius, spiralinių vijų nebeatpažinsime.

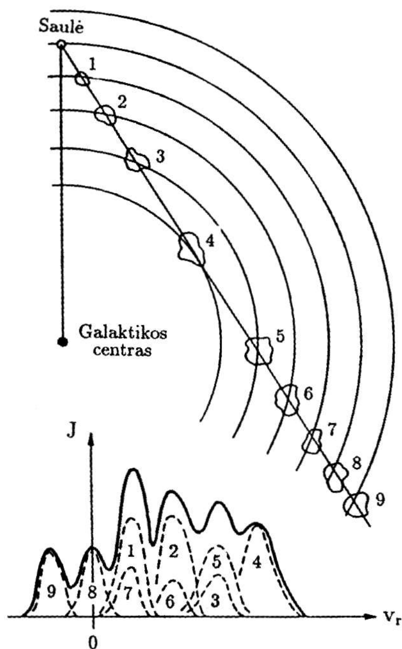
7.9. SPIRALINĖ DISKO STRUKTŪRA, GAUTA RADIJO METODAIS

Tobula Galaktikos spiralinių vijų tyrimo priemonė yra tarpžvaigždinių dujų atomų ir molekulių skleidžiamos radijo bangos. Jos be kliūčių praeina kiaurai pro dulkių debesis nė kiek nesilpnėdamos, taigi radijo bangos padeda matyti ne tik Galaktikos centrines sritis, bet ir toli už centro, kitoje Galaktikos pusėje.

Radijo bangas spinduliuoja kai kurių dujų atomai ir molekulės. Stipriausia yra 21 cm radijo linija, atrasta 1951 m., kurią skleidžia neutralaus vandenilio atomai, kai aplink protoną skriejantis elektronas apvirsta ir ima suktis apie savo ašį į priešingą pusę (smulkiau žr. **6.3.3** poskyryje). Dėl Galaktikos sukimosi apie centrą įvairiose jos vietose esantys vandenilio debesys mūsų atžvilgiu juda skirtingais radialiniais greičiais. Taigi 21 cm linija dėl Doplerio reiškinio pasislenka į trumpųjų ar ilgųjų bangų pusę priklausomai nuo to, ar debesis artėja, ar tolsta. Kadangi daugeliu krypčių Paukščių Take mūsų regėjimo linija kerta kelias spiralines vijas, kurios mūsų atžvilgiu juda skirtingais greičiais, tai 21 cm linija išplinta ir turi tam tikrą profilį, dažniausiai su keliais maksimumais, kurį ir užregistruoja radioteleskopai (**7.11** pav.).

Norint šį profilį iššifruoti, reikia žinoti Galaktikos sukimosi greičio priklausomybės nuo spindulio R kreivę. Iš šios kreivės galima žinoti, kokiu greičiu į mus artėja arba nuo mūsų tolsta įvairiuose nuotoliuose esančios Galaktikos disko sritys. Palyginę šiuos greičius su stebimais 21 cm linijos profilio maksimumais, gauname vandenilio debesų nuotolius. Atidėję šiuos nuotolius ant Galaktikos disko plano, gauname vandenilio debesų pasiskirstymą. 1954 m. J. Ortas su bendradarbiais pirmieji gavo vandenilio pasiskirstymo Galaktikoje planą ir beveik viso Galaktikos disko spiralinę struktūrą.

Panašiai panaudojamos ir kitos radijo linijos: molekulinių debesų spinduliuojama CO molekulės 2,6 mm linija, jonizuoto vandenilio zonų aplink karštas



7.11 pav. *Tarpžvaigždiniai dujų debesys įvairiuose nuotoliuose nuo Galaktikos centro turi skirtingus skriejimo ir radialinius greičius Saulės atžvilgiu. Dėl spektrinės linijos skirtingų poslinkių stebimas sudėtingas jos profilis (ištisinė kreivė). Brūkšniuotos kreivės rodo atskirų debesų linijos profilius. Skaičiai ties profiliais yra debesų numeriai*

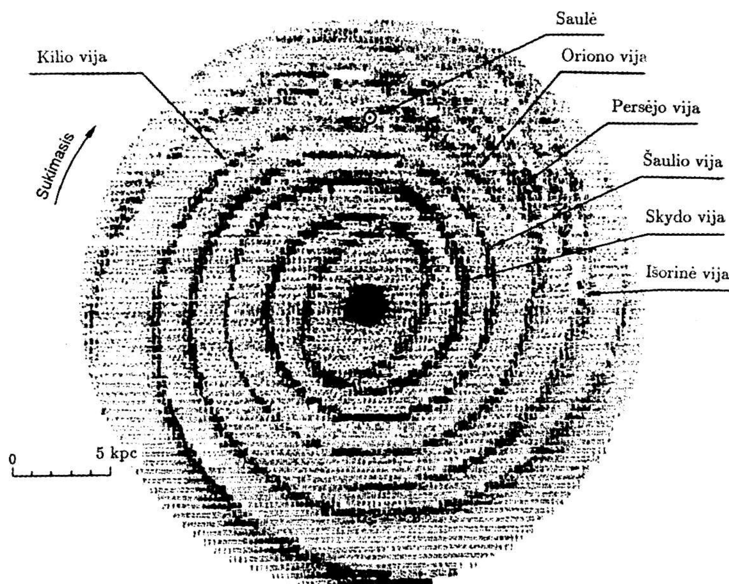
žvaigždės spinduliuojamos rekombinacinių serijų linijos ir kt. CO molekulės radijo bangų tyrimas dar yra tuo reikšmingas, kad jis leidžia gauti informaciją apie pačias tankiausias dulkių debesų sritis, kur vyksta žvaigždėdaros procesai. O neutralaus ir jonizuoto vandenilio radijo bangos pasiekia mus iš daug mažesnio tankio tarpžvaigždinių debesų.

Baigiant radijo metodų apžvalgą, verta paminėti, kad per paskutinįjį dešimtmetį gerokai sumažėjo pasitikėjimas Galaktikos spiralinių vijų vaizdais, kuriuos duoda radijo linijų profiliai, interpretuoti su Galaktikos sukimosi kreive. To priežastis – aptikti lokaliniai Galaktikos sukimosi greičio nevienodumai. Kitaip sakant, Galaktikos sukimosi kreivė nėra visiškai vienoda visomis kryptimis. Dėl to atsiranda painiavos sutapdinant spiralines vijas, gautas iš optinių stebėjimų, iš neutralaus vandenilio debesų, iš jonizuoto vandenilio sričių ir iš CO molekulių radijo bangų stebėjimų.

Ilgus metus astronomai diskutavo – į kurią pusę sukasi galaktikų spiralinės vijos – ar galaktikai sukantis apie centrą vijos užsivynioja, ar išsivynioja. Šio klausimo negalima išspręsti stebint vien tik svetimas galaktikas, nes niekada nežinome, kaip galaktika orientuota mūsų atžvilgiu – ar mes į ją žiūrime iš „viršaus“, ar iš „dugno“. Jau pirmieji mūsų Galaktikos spiralinės struktūros tyrimai parodė, kad jos vijos nukreiptos „atgal“ palyginti su sukimosi kryptimi, t. y. ***Galaktikai sukantis vijos užsivynioja ant jos centro***.

7.10. GALAKTIKOS DISKO STRUKTŪRA. POPULIACIJOS

Iki šiol pasiūlyta daug gerokai besiskiriančių schemų, kaip nubrėžti spiralines Galaktikos vijas, kad jos derėtų tiek su optiniais jaunų žvaigždžių nuotolių nustatymo būdais, tiek su neutralaus ir jonizuoto vandenilio bei molekulinių debesų pasiskirstymu, tiek su Galaktikos sukimosi greičio kreive.



7.12 pav. *Galaktikos spiralinė struktūra pagal K. Saimonsoną*

Čia pateiksime vieną iš tokių schemų, kurią pasiūlė JAV astronomas Kristianas Saimonsonas (*S. C. Simonson*) 1976 metais (**7.12** pav.). Pagal šią schemą Galaktikoje yra dvi spiralinės vijos, išeinančios iš elipsinės formos ***centrinio telkinio*** (angl. *central bulge*) priešingų kraštų. Šio telkinio ilgasis pusašis yra maždaug 4 kpc. Abi spiralinės vijos, besisukančios į tą pačią pusę, padaro kelias apvijas aplink centrą vis toldamos nuo jo. Kampas tarp spiralinių vijų ašies ir apskritimo yra apie 6–8°. Keliose vietose atsiranda naujos vijų atkarpos tarp pagrindinių vijų. Šis reiškinys pastebėtas ir kitose galaktikose.

Saimonsono schemoje Saulės aplinkoje išskiriamos 5 vijos, iš kurių viena – ***Oriono vija*** – yra atkarpa, atsiradusi kažkur Erelio žvaigždyne ir einanti Kilio žvaigždyno kryptimi. Saulė yra šios vijos vidiniame pakraštyje. Oriono vijai priklauso jaunų žvaigždžių sambūriai ir juos lydintys dulkių debesys Gyvatnešio, Skorpiono, Kentauro, Kasiopėjos, Persėjo, Tauro, Oriono žvaigždynuose, daug jaunų padrikųjų spiečių. Dauguma šios vijos žvaigždžių ir tarpžvaigždinių debesų išsidėstę plokštumoje, kuri pasvirusi 10–20° kampu į vidutinę Galaktikos plokštumą. Dėl to Oriono vijos objektai pietų danguje (pvz., Skorpiono–Kentauro jaunų žvaigždžių sambūris) yra virš Galaktikos plokštumos, o objektai šiaurės danguje (pvz., Kasiopėjos–Tauro ir Oriono jaunų žvaigždžių sambūriai, Tauro dulkių debesys ir kt.) yra po Galaktikos plokštuma. Visa ši jaunų žvaigždžių ir tarpžvaigždinių debesų sistema dažnai vadinama Guldo juosta, kuri buvo minima **7.7.2** skirsnelyje. Mes žvelgiame išilgai Oriono vijos Gulbės ir Laputės žvaigždynų link, taigi šia kryptimi



7.13 pav. *Galaktika NGC 1232 Eridano žvaigždyne, panaši į mūsų Galaktiką. Šviesūs lopinėliai spiralinėse vijose – ūkų ir jaunų žvaigždžių kompleksai, kuriuose vyksta aktyvi žvaigždėdara*

labiausiai telkiasi tolimos jaunos žvaigždės, jų spiečiai ir tarpžvaigždiniai debesys. Į priešingą pusę Oriono vija tarsi tęsiasi Kilio žvaigždyno link, bet tai gali būti ir nepriklausoma vijos atkarpa.

Pasak K. Saimonsono, Galaktikos centro kryptimi matomos dvi vijos – artimesnė Saulei ***Šaulio vija***, esanti už 1,8 kpc, ir ***Skydo vija***, esanti už 3 kpc nuo Saulės. Skydo vija, padariusi ratą aplink centrą, jau eina į išorę nuo Oriono vijos ir vadinama ***Persėjo vija***. Vidinis jos kraštas praeina už 1,5 kpc nuo Saulės, vijos storis – apie 1,2 kpc. Šaulio vija, padariusi ne visus du apsisukimus, dingsta Galaktikos pakraštyje. Antroje centro pusėje, tarp Skydo ir Šaulio vijų, atsiranda nauja vija, kuri padaro apie pusę apsisukimo ir pasiekia anticentro kryptį. Ji vadinama ***Išorine vija***.

Pasidairius po Galaktikos apylinkes, galima rasti vieną kitą svetimą galaktiką, gana panašią į pateiktąjį Galaktikos spiralinį vaizdą. Viena tokia galaktika yra NGC 1232 Eridano žvaigždyne, matoma beveik tiksliai statmenai jos disko plokštumai (**7.13** pav.). Pagal centrinio telkinio dydį ir spiralinių vijų pobūdį mūsų Galaktika priklauso Hablo klasei, kuri yra per vidurį tarp Sb ir Sc (žr. **8.1.1** skirsnį). Neseniai pasirodė bandymų įrodyti, kad Galaktikos centrinis telkinys yra pailgos formos, taigi mūsų Galaktika gali priklausyti skersinių galaktikų klasei.

Taigi spiralines galaktikos vijas lokalizuoja karštos didelių masių žvaigždės, jų asociacijos ir spiečiai, supermilžinės, dujų ir dulkių debesys. Nors šie objektai gerai matomi ir mūsų, ir kitose galaktikose, tačiau jų nėra gausu. Daugiau šviesos skleidžia likusios disko žvaigždės ir ypač – centrinis Galaktikos telkinys. Diske susitelkusios įvairaus amžiaus žvaigždės, bet ne senesnės nei 8 mlrd. m. Palyginimui prisiminkime, kad mūsų Saulės amžius yra 4,7 mlrd. m. Tarpžvaigždinės dujos ir dulkės sudaro maždaug 10% visos disko masės. Chemine sudėtimi disko žvaigždės nedaug skiriasi nuo Saulės, t. y. 73% masės sudaro vandenilis, 25% helis ir 2% – sunkesnieji elementai.

Galaktikos diskas yra gana storas. Dažnai disko objektai skirstomi į dvi kategorijas pagal amžių ir užimamą disko storį – jaunieji ir senieji objektai. Iki 11 kpc nuo centro jauni disko objektai, taip pat ir spiralinės vijos, nenukrypsta nuo vidutinės disko plokštumos daugiau kaip 100 pc. Tačiau didesniuose nuotoliuose prasideda Galaktikos disko iškrypimas – maždaug Erelio–Gulbės–Cefėjo žvaigždynų kryptimi tolimos jaunos žvaigždės, neutralaus ir jonizuoto vandenilio debesys sistemingai nukrypsta nuo Paukščių Tako plokštumos aukštyn iki 1,8 kpc ties disko pakraščiu, kuris yra maždaug už 15 kpc nuo centro. Priešingai, pietų dangaus Kilio–Laivagalio–Kentauro žvaigždynų kryptimi jauni disko objektai nukrypsta iki 0,7 kpc žemyn nuo vidutinės Galaktikos plokštumos. Ši disko deformacija prasideda tuoj pat už galaktinės Saulės orbitos. Tolstant nuo Galaktikos centro, diskas dar ir storėja. Jei ties disko viduriu jis yra apie 200 pc storio, tai pakraštyje – 5–6 kartus storesnis.

Senieji disko objektai, daugiausia seni padrikieji spiečiai ir pavienės vidutinių ir mažų masių žvaigždės, užima daug storesnį sluoksnį. Jie pasiskirstę iki 800 pc abipus Galaktikos plokštumos ir sudaro vadinamąjį ***storąjį diską***.

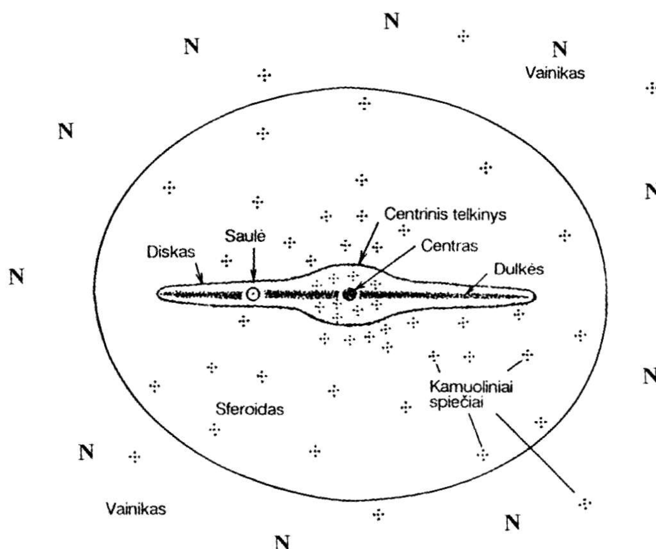
Visos disko ir spiralinių vijų žvaigždės ir tarpžvaigždinės medžiagos debesys dažnai vadinami ***I populiacija*** (angl. *population I*). Diskas yra įterptas į mažesnio tankio ***sferoidą*** (angl. *halo*), turintį tą patį centrą. Sferoide esančios žvaigždės vadinamos ***II populiacija*** (angl. *population II)*. Šiuos terminus pradėjo vartoti JAV astronomas Valteris Badė (*W. Baade*) 1944 m., kai jam pirmą kartą pavyko išskirti pavienes žvaigždes Andromedos galaktikoje. Tada jis įrodė, kad disko ir sferoido žvaigždės skiriasi išsidėstymu erdvėje, fizinėmis savybėmis, chemine sudėtimi ir amžiumi. Sferoido, arba II populiacijos, žvaigždės yra daug senesnės ir turi mažiau sunkiųjų cheminių elementų.

Centrinis Galaktikos telkinys turi maždaug 2,5 kpc spindulį ir jame žvaigždės išsidėsčiusios kelis kartus tankiau negu Saulės aplinkoje. Centriniame telkinyje yra susimaišiusios įvairaus amžiaus ir įvairaus metalingumo žvaigždės, nes į centrą koncentruojasi tiek disko, tiek sferoido žvaigždės.

7.11. GALAKTIKOS SFEROIDAS

Sferinis galaktikos posistemis, arba sferoidas, supa diską iš visų pusių (7.14 pav.) ir yra gerokai už jį didesnis – disko spindulys yra apie 15 kpc, o sferoido – apie 25 kpc. Jis yra truputį suplotas – ašigalinis skersmuo yra 0,8 disko plokštumoje esančio skersmens. Sferoide yra seniausi Galaktikos objektai – pavienės nemetalingos žvaigždės, kurių masės yra mažesnės už Saulės masę, ir kamuoliniai žvaigždžių spiečiai, kurių žinoma apie 150.

Didžiulė kamuolinių spiečių dauguma telkiasi maždaug Galaktikos centro kryptimi (Gyvatnešis, Šaulys, Skorpionas), tačiau kai kurie spiečiai yra ir aukštose galaktinėse platumose, iki pat šiaurės ir pietų galaktinių polių. Erdvinis kamuolinių spiečių pasiskirstymas primena sferą, kurioje spiečių tankis didėja artėjant prie Galaktikos centro. Manoma, kad dar toli gražu ne visi Galaktikos kamuoliniai spiečiai atrasti. Daug jų gali būti pasislėpę už Galaktikos centrinio telkinio ir už Galaktikos centro kryptimi susitelkusių dulkių debesų. Kamuolinių spiečių yra visame sferiniame Galaktikos posistemyje, tačiau 11 iš jų yra toliau negu 30 kpc nuo Galaktikos centro. Kartu su devyniomis vadinamomis sferoidinėmis galaktikėlėmis šie spiečiai sudaro Galaktikos ***vainiką*** (angl. *corona*), kuris tęsiasi iki 300 kpc nuo Galaktikos centro, t. y. 5 kartus toliau negu artimiausios galaktikos – Didysis ir Mažasis Magelano Debesys. Čia paminėtos ***sferoidinės galaktikėlės*** (angl. *dwarf spheroidal galaxies*) yra labai panašios į kamuolinius spiečius, tik turi maždaug 100 kartų didesnius skersmenis ir daug mažesnę centrinę žvaigždžių koncentraciją. Jos



7.14 pav. *Galaktikos schema, žiūrint į jos diską iš briaunos pusės. Raidėmis N pažymėta nematomoji medžiaga Galaktikos vainike*

vadinamos Grįžulo Ratelių, Kilio, Krosnies, Liūto I, Liūto II, Sekstanto, Skulptoriaus, Slibino ir Šaulio sistemomis.

Galaktikos sferoido žvaigždės yra 10–13 mlrd. m. amžiaus ir turi 100–1000 kartų mažiau sunkiųjų elementų negu disko žvaigždės. Jų HR diagrama labai primena kamuolinių spiečių diagramas (žr. **5.50** pav.). Kai kas net mano, kad Galaktikos sferoido pavienės žvaigždės susidarė suirus kamuoliniams žvaigždžių spiečiams, kai jų buvo daug daugiau, negu dabar žinoma. Tai F–G–K–M spektrinių klasių subnykštukės, nemetalingosios G–K submilžinės ir milžinės, horizontaliosios sekos žvaigždės, tarp jų pulsuojančios lyridės, asimptotinės sekos raudonosios milžinės, tarp jų pulsuojančios virginidės, planetiškųjų ūkų centrinės žvaigždės – karštosios subnykštukės ir baltosios nykštukės.

Visos sferoido žvaigždės ir kamuoliniai spiečiai skrieja aplink Galaktikos centrą labai ištęstomis elipsinėmis orbitomis, tai priartėdami prie centro (***perigalaktis***), tai nutoldami nuo jo (***apogalaktis***), orbitų periodai yra maždaug 100 mln. m. eilės. Orbitų polinkiai į Galaktikos plokštumą įvairiausi – nuo 0° iki 90°. Taigi kamuoliniai spiečiai periodiškai, artėdami prie perigalakčio taško arba toldami nuo jo, kerta Galaktikos diską ir centrinį telkinį. Teoriniai skaičiavimai rodo, kad dėl gravitacinės sąveikos tarp kamuolinio spiečiaus ir Galaktikos lauko žvaigždžių spiečius stabdomas ir pamažu spirale artėja prie centro. Kartu gravitacinės jėgos ardo išorines kamuolinio spiečiaus sritis, išplėšdamos atskiras žvaigždes, dėl to spiečius vis mažėja, o jo žvaigždės pamažu virsta pavienėmis lauko žvaigždėmis.

Galaktikos sferoide ir net vainike yra atrasta ir tarpžvaigždinių dujų (išsamiau žr. **6.1.2** poskyrį), kur jos fontanais kyla iš disko, kai ten sprogsta supernovos. Kai kurių dujų čiurkšlių kinetinės temperatūros siekia milijoną kelvinų. Dėl to dauguma šių dujų yra jonizuotos, kai kurie atomai yra netekę net kelių elektronų. Pavyzdžiui, Galaktikos sferoide rasti C IV, Si IV, N V ir O VI jonai. Dalis dujų galėjo būti išplėšta iš Galaktikos disko veikiant Magelano Debesų gravitacijos laukams. Tai vadinamasis ***Magelano srautas*** (angl. *Magellanic stream*) – ilga vandenilio dujų vilksna, nutįsusi nuo Magelano Debesų per Tukanos, Fenikso, Skulptoriaus, Banginio, Žuvų ir Pegaso žvaigždynus.

Sferoido žvaigždžių šviesio funkcija yra panašios formos kaip ir disko žvaigždžių (**7.6** pav.), tik eina daug žemiau, nes jų erdvinis tankis Saulės aplinkoje maždaug 500 kartų mažesnis negu disko žvaigždžių tankis. Taigi 15 pc dydžio kube gali būti vos viena sferoido žvaigždė.

Sferoido žvaigždžių tankį labai sunku įvertinti ties Galaktikos centru, nes ten sferoido žvaigždės susimaišiusios su daug didesnio tankio centrinio telkinio žvaigždėmis. Centrinio telkinio spindulys yra apie 2,5 kpc, todėl už jo prasideda jau gryno sferoido žvaigždės. Sferoido žvaigždžių tankiui apskaičiuoti įvairiuose nuotoliuose nuo Galaktikos centro naudojama formulė:

$$D_{sf} = D_{sf}(R_0)\cdot(R/R_0)^{-7/8}\cdot e^{-10(R/R_0)^{\frac{1}{4}}+10}; \qquad (7.13)$$

čia D_{sf} yra žvaigždžių tankis nuotolyje R nuo Galaktikos centro, $D_{sf}(R_0)$ – sferoido žvaigždžių tankis Saulės aplinkoje arba šviesio funkcija. Pagal šią formulę gauname, kad sferoido žvaigždžių tankis, tolstant nuo Galaktikos centro, kinta šitaip:

R/R_0	0,5	1,0	2,0	3,0
$D_{sf}/D_{sf}(R_0)$	2,75	1,00	0,28	0,11

Galaktikos sferoide aptinkama šiek tiek B ir A spektrinių klasių žvaigždžių, kurių amžius mažesnis už 1–2 mlrd. m., o cheminė sudėtis artima Saulės cheminei sudėčiai. Tokios žvaigždės negalėjo susidaryti sferoide, kurio amžius didesnis nei 10 mlrd. m. Manoma, kad tokios žvaigždės atsirado sferoide palyginti neseniai, mūsų Galaktikai susidūrus su svetima galaktika ir ją suardžius. Taigi sferoido B–A pagrindinės sekos žvaigždės yra tik mūsų Galaktikos viešnios. Kad tokie susidūrimai vyksta, rodo Šaulio sferoidinės galaktikėlės pavyzdys. Dabar ši galaktikėlė yra tik už 15 kpc nuo Galaktikos centro, kurio gravitacinės jėgos veikiama ji bus veikiai suardyta. Jos žvaigždės pasklis po mūsų Galaktikos tūrį.

7.12. DISKO SUKIMASIS IR GALAKTIKOS MASĖ

7.5 poskyryje aptarta Galaktikos sukimosi kreivė priklauso nuo masės pasiskirstymo centriniame telkinyje, diske ir sferoide. Tačiau bandymai teoriškai sumodeliuoti tokį masės pasiskirstymą, kuris atitiktų stebimą sukimosi kreivę, davė netikėtų rezultatų. Pirmiausia buvo atrasta, kad žvaigždžių diskas negali būti pastovus, t. y. negali ilgai egzistuoti, jeigu jo nesupa masyvus sferinis posistemis, kuriame turi būti bent 60% Galaktikos masės. Tačiau nustatyta, kad iš tikrųjų sferoide aptinkama tik apie 20% Galaktikos masės. Norint išspręsti šį prieštaravimą, buvo padaryta prielaida, kad Galaktikos sferoide disko spindulio ribose egzistuoja didelis kiekis ***nematomosios medžiagos*** (angl. *dark matter*).

Antras patvirtinimas, kad yra nematomoji medžiaga, buvo gautas išanalizavus Galaktikos sukimosi greičio priklausomybę nuo nuotolio iki centro. Žinoma, kad bet kurio didelės masės kūno, aplink kurį skrieja mažos masės kūnas, masę galima apskaičiuoti pagal formulę

$$M = \frac{Rv^2}{G}; \qquad (7.14)$$

čia R – orbitos spindulys, v – kūno greitis apskritiminėje orbitoje ir G – gravitacijos konstanta. Iš šios formulės aišku, kad sukimosi greitis yra

atvirkščiai proporcingas R, t. y. nuotoliui padidėjus 4 kartus, sukimosi greitis sumažės 2 kartus. Ši formulė turi galioti ne tik planetoms Saulės sistemoje, bet ir disko žvaigždėms Galaktikoje, tik Galaktikos atveju reikia imti masę, kuri yra orbitos viduje – išorinė masė greičiui įtakos neturi. Kaip matyti iš **7.5** pav., Galaktikos sukimosi greitis ne tik nemažėja, bet netgi turi tendenciją didėti artėjant prie Galaktikos pakraščio. Tai reiškia, kad masė nesibaigia disko krašte, o vis didėja proporcingai R, t. y. tolstant nuo centro. Taip gali būti tik tuo atveju, jei diską supantis Galaktikos sferoidas ir vainikas turi masę, kuri bent 10 kartų, o gal ir daugiau didesnė už regimąją Galaktikos masę.

Trečia: jei Galaktika savo gravitacijos sferoje laiko ir vainiko kamuolinius spiečius, Magelano Debesis ir sferoidines galaktikėles, tai jos masė turėtų būti apie $10^{12}\,M_{\odot}$. Susumavus visų Galaktikos žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos masę, gaunama tik $2{\cdot}10^{11}\,M_{\odot}$. Taigi ir vėl susiduriame su nematomąja medžiaga.

Nematomoji medžiaga pasireiškia ir kitose galaktikose bei jų spiečiuose. Matyt, tai yra labai paplitęs reiškinys Visatoje. Nematomosios medžiagos prigimtis iki šiol nėra žinoma. Ją gali sudaryti labai silpnai šviečiančios mažų masių (apie 0,01–0,001 $M_{\odot}$) žvaigždės. O gal nematomoji medžiaga yra elementariųjų dalelių (pavyzdžiui, neutrinų) ar nematomų kūnų (pavyzdžiui, juodųjų bedugnių) pavidalo? Pastaraisiais metais Galaktikos sferoide ir vainike aptikti karštų dujų, spinduliuojančių Rentgeno spindulius, srautai, kurie galėjo būti išmesti iš Galaktikos didelio supernovų aktyvumo periodais. Tačiau šios medžiagos gerokai per maža. Yra ir egzotiškų hipotezių. Pavyzdžiui, svarstoma, gal tą medžiagą sudaro vieningojo lauko dalelės ***aksionai***, kurios Visatos pradžioje nespėjo suskilti į elementariąsias daleles ir dabar negali niekaip kitaip sąveikauti su medžiaga, kaip tik per gravitacinį lauką. Nematomąją medžiagą galėtų sudaryti ir reliktiniai neutrinai bei antineutrinai (žr. **9.3.3**), jei jų rimties masė būtų nelygi nuliui.

7.13. KAIP ATSIRANDA SPIRALINĖS VIJOS?

Pirmiausia prisiminsime, kas yra Galaktikos spiralinės vijos. Tai sritys, kuriose telkiasi tarpžvaigždiniai dujų ir dulkių debesys ir dėl to susidaro jaunos žvaigždės. Reikia rasti priežastį, kodėl tarpžvaigždiniai debesys telkiasi į spirales.

Pirma mintis, kurią dar 1928 m. išdėstė anglų astronomas Džeimsas Džinsas (*J. H. Jeans*), buvo ši: iš Galaktikos branduolio išmetamos į priešingas puses dvi medžiagos čiurkšlės, kurios, Galaktikai sukantis aplink centrą, pamažu susivynioja. Dabar šis aiškinimas visiškai atmestas, nes įrodyta, kad ir

spiralinių vijų žvaigždės ir debesys skrieja aplink Galaktikos centrą apskritomis orbitomis ir niekada netolsta nuo centro išilgai vijų. Be to, žinoma, kad spiralinės vijos prasideda ne nuo paties centro, o už kelių kpc nuo jo.

Susidaro įspūdis, kad spiralinių vijų problemą gali išspręsti diferencinis Galaktikos disko sukimasis. Jau žinome, kad diskas sukasi kaip kietas kūnas tik netoli centro. Kuo toliau nuo centro, tuo kampinis sukimosi greitis mažesnis. Dėl to bet kokia pailgos formos žvaigždžių grupuotė, nutįsusi radialiai nuo centro, dėl sukimosi greičio nevienodumo pamažu pavirs spiralinės vijos atkarpa. Tačiau per porą apsisukimų tokia vija pavirs apskritimu, be to, per tą laiką jaunos masyvios didelio šviesio žvaigždės išnyks dėl greitos evoliucijos. Antra vertus, dėl diferencinio Galaktikos sukimosi jau esama spiralinė struktūra per kelis apsisukimus turi išnykti.

1964 m. amerikiečiai Čija Linas (*C. C. Lin*) ir Frenkas Šu (*F. H. Shu*) pasiūlė spiralinių vijų susidarymo ***banginę teoriją***, pagal kurią spiralinės vijos yra padidėjusio medžiagos tankio bangos, kurios sukasi aplink Galaktikos centrą kaip kompiuterio diskas. Šios tankio bangos juda panašiai kaip garso bangos ar kaip bangos vandens paviršiuje, t. y. jos neperneša medžiagos. Galime įsivaizduoti, kad spiralinių vijų vietose žvaigždės ir tarpžvaigždiniai debesys tarsi truputį lėčiau skrieja aplink Galaktikos centrą ir todėl ten jų tankis padidėja. Spiralinių tankio bangų sukimosi greitis paprastai skiriasi nuo disko žvaigždžių ir dujų sukimosi greičio, bet tam tikrame nuotolyje nuo centro abu greičiai sutampa. Šis nuotolis vadinasi ***korotacijos spinduliu.*** Disko sritys, esančios arčiau centro negu korotacijos spindulys, sukasi greičiau negu spiralinis ornamentas, ir todėl medžiaga patenka į spiralinę viją iš vidinės pusės. Jei greičių skirtumas pakankamai didelis, susidaro smūginė banga, kurioje dujos susispaudžia bent 10 kartų, ir prasideda žvaigždėdaros procesas. Disko srityse, tolimesnėse negu korotacijos spindulys, spiralinis ornamentas sukasi greičiau už disko žvaigždes ir dujas, todėl jos susiduria su spiraline vija iš išorinio jos krašto.

Mūsų Galaktikos korotacijos spindulys yra maždaug 10 kpc, taigi yra artimas Saulės nuotoliui nuo Galaktikos centro, todėl ir spiralinis ornamentas, ir Saulė sukasi aplink centrą beveik vienodu greičiu. Dėl šios priežasties Saulė labai retai susiduria su tirštais dujų ir dulkių debesimis. Manoma, kad tai yra viena iš priežasčių, dėl kurių Žemėje per daugelį galaktinių metų buvo palankios sąlygos gyvybei atsirasti ir išgyventi.

Kadangi Galaktikos vidinėse srityse (arčiau negu Saulės orbita) dujų ir dulkių debesys susiduria su spiraline vija iš vidinės vijos pusės, tai ten susidaro didžiausias dujų tankis ir ten pirmiausia randasi žvaigždės. Kadangi žvaigždės sukasi greičiau negu vijos, jos kerta spiralinę viją. Kol tai vyksta, žvaigždės spėja pasenti. Taigi vidinėje spiralės pusėje žvaigždės turi būti jaunesnės negu išorinėje.

Tačiau kas sukelia šias tankio bangas? Tam, kad susidarytų bangos vandens paviršiuje, reikia duoti impulsą, pavyzdžiui, įmesti į vandenį akmenuką. Galaktikoje tankio bangas gali sudaryti gravitacijos lauko sutrikdymai. Juos gali sukelti potvyniniai Magelano Debesų trikdymai arba nesimetriškas žvaigždžių pasiskirstymas aplink Galaktikos centrą.

Kai kurios spiralinės vijos, tiksliau – jų atkarpos, negali būti paaiškintos tankio bangų teorija. Tokia yra Oriono vija, kurios vidiniame pakraštyje yra Saulė.

7.14. GALAKTIKOS MAGNETINIS LAUKAS

Išilgai Galaktikos spiralinių vijų driekiasi magnetinio lauko jėgų linijos. Magnetinis laukas neturi jokios įtakos žvaigždžių judėjimui, tačiau jis vaidina nemažą vaidmenį tarpžvaigždinių dujų ir kosminių spindulių judėjimui. Galaktikos magnetinis laukas yra maždaug 100 000 kartų silpnesnis negu Žemės magnetinis laukas – jo srauto tankis yra tik $(0{,}5–2{,}0)\cdot 10^{-9}$ T. Nors ir labai silpnas, Galaktikos magnetinis laukas yra nutisęs per tūkstančius šviesmečių ir turi nemažos įtakos tarpžvaigždinių dujų ir dulkių evoliucijai. Galaktikos magnetinį lauką palaiko jonizuotų dujų masių judėjimas veikiant dinamo mašinos efektui, kuris mechaninę judėjimo energiją paverčia elektros srovės energija, kartu ir šios srovės indukuoto magnetinio lauko energija.

Magnetinis Galaktikos laukas pasireiškia keliais būdais. Matėme, kad spiralinėse vijose yra padidėjęs dujų tankis, kartu suspaustos ir magnetinės linijos, einančios išilgai vijų. Kai į tokį lauką įlekia didelio greičio elektronas, jis juda spirale vyniodamasis aplink magnetinio lauko linijas ir spinduliuodamas poliarizuotas metrines radijo bangas (sinchrotroninis spinduliavimas). Iš spiralinių vijų sklindančios radijo bangos yra kelis kartus stipresnės negu iš kitų disko sričių.

Kitas reiškinys, patvirtinantis spiralinių vijų magnetinio lauko buvimą, yra tarpžvaigždinių dulkelių išsklaidytos šviesos poliarizacija (smulkiau žr. **6.4.2** skirsnyje). Nepoliarizuotoje šviesoje elektromagnetinės bangos elektrinio lauko svyravimai orientuoti visokiais kampais statmenai bangos sklidimo krypčiai. Poliarizuotoje šviesoje bangų elektrinio lauko svyravimai yra lygiagretūs. Stebėjimai rodo, kad už tamsių dulkių debesų esančių žvaigždžių šviesa iš dalies (iki 7%) poliarizuota. Tačiau sferinės dulkelės negali sukelti šviesos poliarizacijos – tam jos turi būti pailgos. Be to, tokios dulkelės turi būti kolektyviai orientuotos tam tikra kryptimi. Dėl susidūrimų su dujų atomais dulkelės turi greitai suktis, kaip propeleriai. Nėra abejonės, kad dulkeles orientuoja magnetinis laukas, bet jis gali tai padaryti tik tada, kai į dulkelių sudėtį įeina magnetingos medžiagos. Silikatinių ar grafitinių dulkelių magnetinis laukas neveikia. Dabar manoma, kad metalingos dalelės kartu su ledu įeina į

tarpžvaigždines dulkes supančią mantiją. Pailgos dulkelės orientuojamos taip, kad jų sukimosi ašys sutampa su magnetinio lauko jėgų linijų kryptimi. Žvaigždžių šviesos poliarizacijos tyrimai teikia informacijos apie prieš tas žvaigždes esančių dulkių ir dujų mišinio debesų magnetinių laukų linijų orientaciją erdvėje. Tomis Paukščių Tako kryptimis, kur mes žiūrime statmenai spiralinėms vijoms (pavyzdžiui, Persėjo kryptimi) žvaigždžių poliarizacija yra stipriausia ir tvarkingai orientuota. Tomis kryptimis, kur žvilgsnis eina išilgai vijos (Gulbėje), poliarizacija yra daug mažesnė ir netvarkinga.

Seniai pastebėta, kad tarpžvaigždinių dujų ir dulkių mišinio debesys dažniausiai yra ištįsę maždaug lygiagrečiai galaktiniam pusiaujui, einančiam Paukščių Tako viduriu. Tai irgi yra magnetinių laukų sukeltas reiškinys.

Manoma, kad tarpžvaigždiniai magnetiniai laukai sulaiko Galaktikoje elektringas elementariąsias daleles, sudarančias kosminius spindulius (smulkiau žr. **6.7** poskyryje). Tai didelės energijos elektronai, protonai, helionai ir kitų elementų branduoliai, kurie iš visų pusių apšaudo Žemės atmosferą. Šios dalelės išmetamos ir pagreitinamos supernovų sprogimuose ir dėl didelio greičio greit apleistų Galaktiką, jeigu nebūtų magnetinių laukų, kurie iškreipia dalelių judėjimo trajektorijas ir jas paverčia uždaromis kreivėmis.

7.15. GALAKTIKOS MODELIS

Norint suprasti Galaktikos raidą, reikia turėti kiek galima tikslesnius duomenis apie žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos pasiskirstymą ir judėjimą įvairiuose Galaktikos posistemiuose – spiralinėse vijose, diske, sferoide, centriniame telkinyje, vainike. Būtų idealu išmatuoti visų žvaigždžių duomenis ir atidėti visas jas erdviniame modelyje. Bet tai neįmanoma – žvaigždžių yra apie 250 milijardų, be to, stebėjimams trukdo tarpžvaigždiniai dulkių debesys. Todėl astronomai eina kitu keliu. Iš pradžių jie kruopščiai ištiria keliolika dangaus aikštelių įvairiomis Galaktikos kryptimis stengdamiesi siekti kuo toliau – jei įmanoma, tai iki pat Galaktikos krašto. Būtų geriausia nustatyti kiekvienos žvaigždės spektrinę klasę, absoliutinį ryškį, metalingumą, nuotolį, amžių ir kitas fizines charakteristikas. Tačiau iki šiol būdavo sunku nustatyti šiuos parametrus žvaigždėms, silpnesnėms už 15-ąjį ryškį. Todėl dažniausiai buvo apsiribojama tik žvaigždžių ryškio ir spalvos indekso nustatymu.

Po to kuriamas vadinamasis ***Galaktikos modelis*** – teoriškai apskaičiuojamas toks žvaigždžių pasiskirstymas visoje Galaktikoje, kad jis sutaptų su stebimuoju žvaigždžių pasiskirstymu pagal ryškius ir spalvos indeksus ištirtose kryptyse. Šiuose modelių skaičiavimuose atsižvelgiama ir į tai, ką mes matome svetimose panašaus tipo galaktikose.

Šiuo metu tiksliausiu laikomas JAV astronomo Džono Bokalo (*J. N. Bahcall*) ir jo bendradarbių apskaičiuotas Galaktikos modelis. Jis remiasi 17 dan-

gaus aikštelių tyrimais įvairiomis kryptimis, daugiausia vidutinėse ir aukštose galaktinėse platumose, kur mažiau trukdo tarpžvaigždinė ekstinkcija.

Skaičiuojant Galaktikos modelius, priimama, kad Saulės aplinkoje bent 6 kpc spinduliu visos žvaigždės priklauso arba diskui, arba sferoidui. Neturint duomenų apie žvaigždžių absoliutinius ryškius arba šviesio klases, panaudojama šviesio funkcija, t. y. žvaigždžių tankio priklausomybė nuo absoliutinio ryškio, aprašyta **7.6** poskyryje.

Iš Dž. Bokalo Galaktikos modelio gauname, kad disko masė yra $6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, sferoido masė yra $2 \cdot 10^{9} M_{\odot}$, centrinio telkinio masė yra $1 \cdot 10^{10} M_{\odot}$. Kaip jau minėta **7.11** poskyryje, Galaktikos tūryje dar yra $2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ nematomosios medžiagos.

Kai kurie tyrinėtojai, be išvardytų pagrindinių Galaktikos posistemių, dar išskiria vadinamąjį ***senąjį*** arba ***storąjį diską***. Šio disko žvaigždės yra abipus Galaktikos plokštumos iki 800 pc. Kiti astronomai teigia, kad tai yra plonojo disko retėjantis tęsinys.

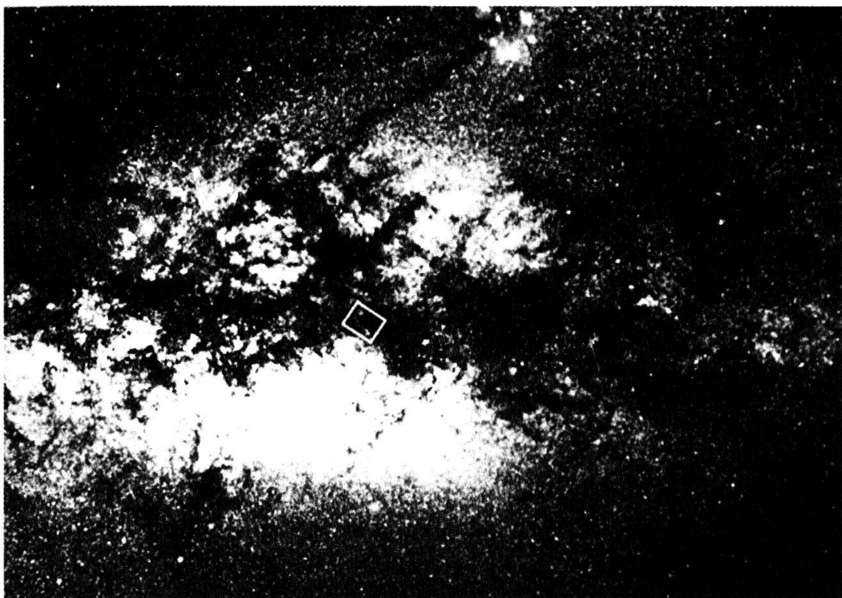
7.16. GALAKTIKOS CENTRAS IR CENTRINIS TELKINYS

Iki šiol ne kartą teko paminėti centrinį telkinį*, kaip atskirą Galaktikos posistemį. Iš pirmo žvilgsnio centrinis telkinys lyg ir galėtų būti laikomas disko ir sferoido tęsiniu Galaktikos centro link. Tačiau yra keletas požymių, rodančių, kad centrinė Galaktikos sritis yra ypatinga jos vieta, kur vyksta milžiniško masto dar iki galo nesuprasti procesai. Pagal žvaigždžių tankį ir formą Galaktikos centrinis telkinys primena elipsinę galaktiką.

Galaktikos centras yra Šaulio žvaigždyne su 2000 m. koordinatėmis $\alpha = 17^{h}45{,}6^{m}$, $\delta = -\ 29°00'$. Regimajame ir ultravioletiniame spektro ruožuose Galaktikos centras nematomas, nes jį užstoja dideli tankūs dulkių debesys, esantys Šaulio ir Skydo spiralinėse vijose (**7.15** pav.). Kai kurie tamsūs debesys Galaktikos centro kryptimi tęsiasi iš Gyvatnešio ir Skorpiono žvaigždynų ir greičiausiai priklauso Oriono spiralinei vijai, greta kurios yra Saulė. Apskaičiuota, kad visi šie tarpžvaigždiniai debesys susilpnina sklindančią iš Galaktikos centro šviesą bent 25–30 ryškių.

Radijo bangų ruože Galaktikos centre matomas taškinis šaltinis, skleidžiantis sinchrotronines radijo bangas ir vadinamas ***Sgr A*** (t. y. Šaulio A šaltiniu). Aplink šį radijo bangų šaltinį maždaug 1' ribose (tai atitinka maždaug 3,5 pc) radijo bangose stebimos ***trys jonizuotų dujų vijos***, spirališkai artėjančios centro link (**7.16** pav.). Infraraudonuosiuose spinduliuose matomas Šaulio A šaltinis ir aplink jį difuzinis švytėjimas, kurį skleidžia žemų temperatūrų žvaigždės ir šilti (300 K) dulkių debesys. Šaulio A šaltinis skleidžia taip pat rentgeno ir gama spindulius. Dauguma tyrinėtojų yra tos nuomonės,

* Centrinis telkinys kartais vadinamas baldžu (angl. *bulge* – išgaubtumas, išsipūtimas).

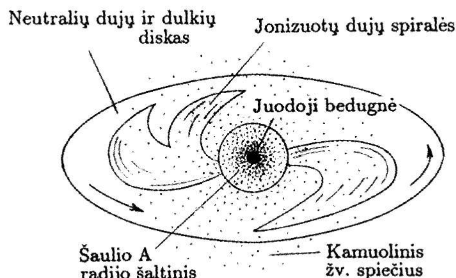


7.15 pav. *Paukščių Takas Šaulio žvaigždyne. Matyti centrinis žvaigždžių telkinys ir dulkių debesys, užstojantys Galaktikos centrą, kuris pažymėtas stačiakampiu*

kad Galaktikos centre yra maždaug 3–4 mln. $M_\odot$ masės ***juodoji bedugnė***, kurią supa 1,5 pc spindulio jonizuotų dujų verpetas. Nuo 1,5 iki 10 pc nuo centro tęsiasi besisukantis tankus ***neutralių dujų*** (daugiausia molekulinio vandenilio) ***ir dulkių diskas***, pakrypęs savo plokštuma į Galaktikos plokštumą apie 20°. Šiame diske ir išryškėja minėtosios trys spiralinės vijos, kuriomis disko medžiaga siurbiama į juodąją bedugnę. Visą šią erdvę užima dar ir ***kamuolinis žvaigždžių spiečius***, kurio masė yra apie 5–10 mln. $M_\odot$. Bent dalis to spiečiaus žvaigždžių turi būti masyvios ir jaunos, susidariusios prieš 1 mln. metų. Žvaigždžių tankis ties centru turi būti daug didesnis negu kamuoliniuose spiečiuose. Vidutinis nuotolis tarp žvaigždžių – vos 1 šviesos savaitė. Tai tik 30 kartų toliau negu nuotolis tarp Saulės ir Plutono. Jeigu Saulė ir Žemė būtų ties Galaktikos centru, danguje matytume daugybę šviesių žvaigždžių, tokių kaip Aušrinė arba dar šviesesnių. Naktį būtų taip šviesu, kaip esant Mėnulio pilnačiai. Juodosios bedugnės aplinkoje skriejančios šio spiečiaus žvaigždės kartais priartėja pernelyg arti ir tampa jos aukomis – gravitacinės potvynio jėgos suardo šias žvaigždes ir jų medžiaga dingsta bedugnėje.

Priėmus tokį centrinės Galaktikos dalies modelį, galima paaiškinti visus iš ten sklindančius spindulius. Šaulio A šaltinio sinchrotronines radijo bangas skleidžia elektronai, lekiantys beveik šviesos greičiu juodąją bedugnę supančio akrecinio disko magnetiniame lauke. Radijo bangų sąveikoje su greitais elektronais susidaro Rentgeno spinduliai. Optinių spindulių sąveika su

elektronais duoda gama kvantus. Infraraudonuosius spindulius dešimčių μm ruože skleidžia įkaitę dulkių debesys, o kelių μm ruože – žemų temperatūrų žvaigždės supermilžinės, spiečiaus nariai. Šios žvaigždės matomos Galaktikos centro nuotraukose, gautose jautriais infraraudoniesiems spinduliams imtuvais.



7.16 pav. *Galaktikos centrinės srities schema*

Aprašytojo 10 pc spindulio molekulinio vandenilio disko išorėje daugiau kaip 100 pc tęsiasi labai karštos jonizuotos plazmos rajonas, skleidžiantis šiluminius radijo ir Rentgeno spindulius. Šiame rajone yra ir pavienių jonizuoto vandenilio debesų.

Maždaug 150 pc nuotolyje nuo Galaktikos centro yra kitas ypatingas struktūrinis elementas – ***molekulių ir dulkių debesų žiedas***, kurio skersmuo yra apie 2°. Jis sukasi aplink centrą apie 50 km/s greičiu ir kartu tolsta nuo jo apie 150 km/s greičiu. Šiame žiede yra astronomams gerai žinomas Šaulio B2 molekulinis debesis, kurio masė yra 3 mln. $M_{\odot}$, o skersmuo 30 pc (didžiausias visoje Galaktikoje). Šiame debesyje aptiktos visos molekulės, kokių tik yra žinoma Galaktikoje (daugiau nei 50 rūšių). Šis molekulinis žiedas juda taip, lyg būtų prieš 1 mln. m. išstumtas iš centrinės Galaktikos dalies, tačiau šio išstūmimo mechanizmas kol kas visai neaiškus. Galbūt tai padarinys staigaus masyvių O žvaigždžių gimimo pliūpsnio.

Visą iki šiol aprašytą centrinę Galaktikos sritį gaubia besisukantis ***dujų diskas***, kuris baigiasi kažkur ties 650 pc (arba 4°,4) nuo centro. Diskas pakrypęs į Galaktikos plokštumą maždaug 20° kampu, kaip ir juodąją bedugnę supantis 10 pc spindulio diskas. Diską sudaro daugiausia molekulinis vandenilis; jo masė yra 100 mln. $M_{\odot}$.

Toliau nuo centro yra aptikti keleto ***dujinių žiedų fragmentai***, tolstantys nuo centro maždaug 50–100 km/s greičiu. Iš šių fragmentų didžiausią masę turi vadinamoji 3 kpc vija, kurią sudaro dujų ir dulkių debesys bei jaunų žvaigždžių telkiniai. Panašios vijos fragmentas aptiktas ir anapus Galaktikos centro. Galbūt tai ir yra mūsų Galaktikos spiralinių vijų pradžia. Maždaug ties šių vijų pradžia baigiasi Galaktikos centrinis žvaigždžių telkinys, turintis 10 mlrd. $M_{\odot}$ masę. Danguje jis užima plotą pagal galaktinę ilgumą ±15° ir pagal galaktinę platumą ±8°. Erdvėje tai yra elipsoidas, kurio plokštumoje esantis spindulys yra 2,5 kpc, o statmenas spindulys – 1,2 kpc. Centrinis telkinys greičiausiai nėra apskritas ir Galaktikos plokštumoje, o turi elipsoido pavidalą su pusašiais 4 kpc ir 2,5 kpc. Nuo šio elipsoido ilgosios ašies galų prasideda Galaktikos spiralinės vijos. Ilgoji elipsoido ašis eina nedideliu kampu (20–30°) į mūsų regėjimo spindulį – centrinio telkinio žvaigždės, esančios rytinėje pusėje, yra arčiau mūsų negu vakarinės jo žvaigždės. Taigi

mūsų Galaktika šiek tiek primena skersinę galaktiką (smulkiau apie skersines galaktikas žr. 8 skyriuje.).

Aprašydami Galaktikos centrinį telkinį, iki šiol daugiausia dėmesio skyrėme dujų ir dulkių pasiskirstymui. Dabar aptarkime, kokios žvaigždės sudaro šį telkinį. Jau anksčiau minėjome, kad centriniame telkinyje yra susimaišiusios disko ir sferoido žvaigždės, taigi reikia tikėtis didelės cheminės sudėties įvairovės ir žvaigždžių orbitų formų – nuo apvalių disko žvaigždėms iki labai ištęstų elipsių sferoido žvaigždėms. Nors tolimų ir silpnų centrinio telkinio žvaigždžių išsamūs tyrimai dar tik pradėti, jau aišku, kad ten vyrauja žvaigždės su Saulės chemine sudėtimi, o kartais net ir su sunkiųjų elementų pertekliumi. Tik maža dalis žvaigždžių turi sunkiųjų elementų trūkumą. Centriniame telkinyje, ypač Galaktikos plokštumoje, gausu molekulių ir dulkių debesų, kuriuose iki šiol susidaro jaunos karštos žvaigždės. Tačiau nėra abejonės, kad pagrindinę centrinio telkinio masę, kaip ir diske bei sferoide, sudaro G–K–M spektrinių klasių nykštukės.

7.17. SAULĖ GALAKTIKOJE

Mūsų Saulė yra eilinė Galaktikos G2 spektrinės klasės pagrindinės sekos žvaigždė, viena iš pustrečio šimto milijardų. Ji skrieja beveik apskrita orbita, esančia nuo Galaktikos centro už 8,5 kpc. Skriejimo orbita greitis 220 km/s, orbitinis periodas – 230 mln. metų.

Iš pirmo žvilgsnio atrodo, kad Saulė niekuo neišsiskiria iš kitų žvaigždžių, nebent tik tuo, kad ji pavienė, kai daugybė kitų žvaigždžių yra dvinarės, trinarės ir daugianarės. Tačiau ji turi gražią planetų sistemą, kurios trečioji nuo Saulės planeta – Žemė – yra gyvenama.

Bet ne vien tuo Saulė išsiskiria iš kitų žvaigždžių. Jau minėjome, kad Saulės orbita yra visai netoli unikalios vietos Galaktikoje – korotacinio spindulio, t. y. tos vietos, kur disko sukimosi greitis beveik sutampa su spiralinio ornamento sukimosi greičiu. Dėl to Saulė labai retai susiduria su spiralinėmis vijomis, o tai galėjo būti viena iš priežasčių, kodėl Žemėje radosi gyvybė. Saulės sistema susidarė prieš 4,7 mlrd. metų, kai prosaulinis dujų ir dulkių debesis perkirto vieną iš spiralinių tankio bangų Galaktikoje – Šaulio viją. Per visą šį laiką Saulės orbita buvo tarp Šaulio ir Oriono vijų. Saulė 20 kartų apskriejo Galaktikos centrą, bet nė karto nesusitiko su spiraline tankio banga bei dujų ir dulkių debesimis. Šiuo metu Saulė yra visai arti vidinio Oriono vijos pakraščio, vos už 120–150 pc nuo molekulių ir dulkių debesų Tauro–Vežėjo ir Gyvatnešio–Skorpiono žvaigždynuose. Abu čia paminėti debesų telkiniai yra priešingose Saulei dangaus pusėse. Laimei, Saulės orbita praeina per vidurį tarp šių debesynų, kurių vienas matomas Galaktikos centro, kitas – anticentro kryptimi.

Skriedama aplink Galaktikos centrą, Saulė dar šiek tiek svyruoja aukštyn

ir žemyn, tai pakildama virš disko plokštumos, tai nusileisdama po ja. Visas svyravimo periodas yra nuo 26 iki 37 mln. metų (tiksliau nežinomas), didžiausias nukrypimas nuo plokštumos yra maždaug tarp 50 ir 100 pc. Paskutinį kartą Saulė perkirto Galaktikos plokštumą prieš 3 mln. metų, dabar yra maždaug 10 pc virš plokštumos.

Kaip matome, Saulės judėjimas Galaktikoje susideda iš apskritiminio judėjimo aplink Galaktikos centrą ir svyruojančio judėjimo Galaktikos plokštumos atžvilgiu. Saulės skriejimo orbita aplink Galaktikos centrą kryptis yra statmena krypčiai į centrą, ji lekia Gulbės žvaigždyno kryptimi.

Galaktikos sferoido žvaigždės, esančios netoli Saulės, nedalyvauja disko sukimesi aplink centrą. Jos juda savo individualiomis elipsinėmis orbitomis aplink centrą, tai priartėdamos prie jo ir pasinerdamos į centrinį telkinį, tai nutoldamos iki pat sferoido pakraščio, maždaug 15–20 kpc nuotolyje nuo centro. Jų orbitos orientuotos įvairiausiais kampais į disko plokštumą. Jeigu disko žvaigždės yra mūsų kaimynės ilgą laiką, gal net kelis apsisukimus aplink centrą, tai sferoido žvaigždės yra laikinos kaimynės ir palyginti greitai nutols, lėkdamos Galaktikos centro link arba tolyn nuo jo. Kuo toliau sferoido žvaigždės nuo centro, tuo jos skrieja lėčiau, todėl Saulės aplinkoje daugumos jų greičiai centro atžvilgiu yra mažesni negu disko žvaigždžių orbitiniai greičiai. Dėl Saulės judėjimo savo orbita, tos sferoido žvaigždės, kurios yra Gulbės ir jai artimų žvaigždynų kryptimi, artėja prie mūsų, o tos kurios yra Burių ir Kilio žvaigždynų kryptimi – tolsta. Šie artėjimo ir tolimo greičiai gana dideli – jie kartais siekia net 300 km/s ir daugiau. Dėl to dauguma sferoido žvaigždžių Saulės aplinkoje vadinamos ***greitosiomis žvaigždėmis*** (angl. *high velocity stars*).

8

SKYRIUS

GALAKTIKOS

Algimantas Ažusienis

Stebint vizualiai pro teleskopus arba žiūronus, galaktikos atrodo kaip miglotos, dažniausiai pailgos, maždaug elipsoido arba lęšio formos šviečiančios, į kraštus palaipsniui blunkančios dėmelės. 1755 m. I. Kantas rašė, jog miglotos dėmelės danguje – tai atskiros žvaigždžių sistemos, panašios į Paukščių Tako Galaktiką. Jos visos sudaro Didžiąją paukščių takų sistemą. V. Heršelis (žr. **6.1.1.**) XVIII a. pabaigoje visas danguje šviečiančias dėmeles pavadino ūkais, iš pradžių neskirdamas, ar tai yra mūsų Galaktikos objektai – tarpžvaigždinės medžiagos debesys ir žvaigždžių spiečiai – ar svetimos galaktikos. Vėliau jis ėmė samprotauti, kad dalis ūkais pavadintų objektų yra tolimos galaktikos, kai kurios gal net daug didesnės už mūsiškę. Tačiau šia mintimi jis abejojo pats, jai prieštaravo kai kurie kiti astronomai. Ginčai tęsėsi visą XIX a. ir XX a. pradžioje.

Pagaliau Švedijos astronomas Knutas Lundmarkas (*K. E. Lundmark*) bei JAV astronomai Heberis Kertis (*H. D. Curtis*) ir Edvinas Hablas (*E. P. Hubble*) savo darbais 1918–1923 m. galutinai įrodė, kad mūsų Galaktika nėra vienintelė, kad daugelis vadinamųjų ūkų iš tikrųjų yra kitos galaktikos. Lėmė tai, kad didžiaisiais teleskopais gautų artimiausiųjų galaktikų fotografinių vaizdų pakraščiuose buvo regimos ir atskiros šviesesnės žvaigždės. Ilgainiui artimesnių galaktikų fotografiniuose ar elektroniniais prietaisais gautuose vaizduose pradėta aptikti ir kamuolinius spiečius bei emisinius, o kartais ir planetiškuosius ūkus. Atskiras žvaigždes buvo galima įžiūrėti nebe tik pakraščiuose, bet ir didžiojoje tokių galaktikų tūrio dalyje, kai ypač tolimos galaktikos net ir pro didžiausius teleskopus tebeatrodo kaip mažytės dėmelės.

Lietuvos danguje plika akimi kaip vos įžiūrima šviečianti dėmelė matoma vienintelė galaktika, pavadinta ***Didžiuoju Andromedos ūku***, arba tiesiog ***Andromedos galaktika***. Iki jos 680 kpc. Paprastai ji, kaip ir daugelis kitų nelabai silpnų galaktikų, žymima Š. Mesjė arba NGC katalogų numeriais: M 31. arba NGC 224. Pietų pusrutulio danguje plika akimi matomos dvi galaktikos, atrodančios lyg blausiai švytintys debesėliai netoli Paukčių Tako, tary-

tum kokios Paukščių Tako atplaišos. Viena jų gavo ***Didžiojo Magelano Debesies*** (***DMD***) (angl. *Large Magellanic Cloud* (*LMC*), o kita – ***Mažojo Magelano Debesies*** (***MMD***) (angl. *Small M. C.* (*SMC*). vardus. Jos yra daug mažesnės už mūsų Galaktiką. Tai stambiausi mūsų Galaktikos palydovai (žr. **22** lentelę knygos pabaigoje). Nuo Saulės iki DMD yra 52 kpc, iki MMD – 63 kpc.

8.1. TRYS PAGRINDINĖS GALAKTIKŲ KLASĖS

Galaktikų klasifikacijos schemą pasiūlė E. Hablas 1925 m. Jis galaktikas pagal jų išvaizdą suskirstė į tris klases. Tai ***spiralinės*** (***S***), ***elipsinės*** (***E***) ir ***netaisyklingosios*** (***Ir***) galaktikos (žr. **8.1–8.2** ir **8.14** pav.). Jų pagrindinės charakteristikos surašytos **21** lentelėje. Šią schemą vėliau dar tikslino ir tobulino pats E. Hablas bei kiti autoriai. Kai kurie autoriai yra pasiūlę ir daug detalesnių arba net visiškai kito principo klasifikacijos schemų. Tačiau dažniausiai laikomasi E. Hablo schemos, kuri ne tik atspindi esminius galaktikų prigimties bruožus, bet ir yra gana paprasta.

Tą pačią Hablo schemą bandoma taikyti ir palyginti mažai žvaigždžių teturinčioms mažo šviesio galaktikoms – nykštukėms, kurios spinduliuoja šimtą, tūkstantį, net šimtą tūkstančių kartų silpniau už tokias galaktikas milžines, kokios yra Paukščių Tako ar Andromedos galaktikos. Hablo schemos kūrimo metu nykštukių tebuvo žinoma vos viena kita. Tobulėjant stebėjimų technikai, palaipsniui išryškėjo, kad jos sudaro didžiulę visų galaktikų daugumą. Jos imtos žymėti nykštukų simboliu d: dS, dE, dIr. Simbolis d dažniausiai prirašomas tuomet, kai nykštukinės galaktikos absoliutinis ryškis $M_V > -16$.

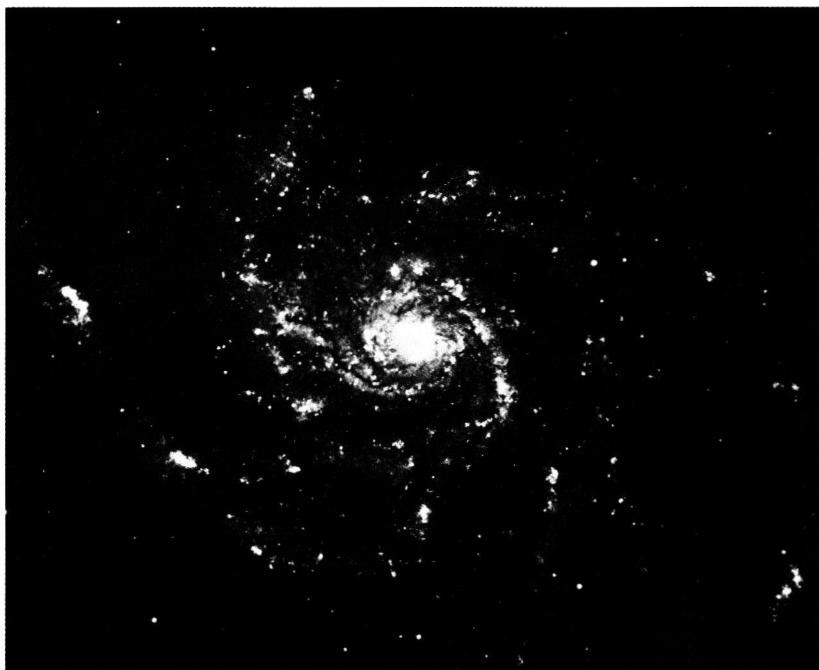
Būtina žinoti, kad **21** lentelėje pateikti duomenys tik apie vadinamąją spinduliuojančiąją medžiagą. Tačiau maždaug prieš 40 metų pradėjo aiškėti, kad tai toli gražu nėra viskas. Remiantis galaktikų ir galaktikų spiečių dinamikos tyrimų duomenimis, galima teigti, kad galaktikos, ypač stambiosios, esti net iki dešimt kartų masyvesnės, o jų gravitacinius laukus sukurianti medžiaga nuo galaktikų centrų nusitęsusi kelis kartus toliau, negu rodo žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos šviesa bei kitos elektromagnetinės bangos. Matyt, tai yra kažkokia nežinoma, elektromagnetinių bangų nespinduliuojanti ar beveik nespinduliuojanti medžiaga. Ši hipotetinė medžiaga pavadinta ***nematomąja medžiaga***. Manoma, kad ji apima žvaigždžių regimuosius galaktikų tūrius ir dar aplink juos sudaro dideles nematomas ar beveik nematomas aureoles – galaktikų ***vainikus***, kuriuose be nematomosios medžiagos dar gali būti šiek tiek pavienių žvaigždžių, vienas kitas žvaigždžių kamuolinis spiečius, labai mažo tankio pasklidusių karštų dujų, atskirų šaltų dujų debesų.

Vienos hipotezės teigia, kad nematomąją medžiagą sudaro neutrinai su antineutrinais (jei jie turi rimties masę) ir galbūt kai kurios kitos labai silpnai

sąveikaujančios dalelės – WIMP'ai (žr. **9.7.2**), pavyzdžiui, neutralinai, aksionai, gravitinai, fotinai, vinai, zinai, gliuinai, veidrodinės dalelės ir kt. Pagal kitas, vadinamąsias ***barionines hipotezes,*** nematomoji medžiaga – tai daugybė visai mažos masės ir dėl to nešviečiančių arba beveik nešviečiančių kūnų, sudarytų iš atomų (taigi iš barionų). Čia galėtų būti ir meteoroidai, ir kometų branduoliai, ir asteroidai, ir planetos, ir pereinamosios masės tarp planetų bei žvaigždžių objektai. **21** lentelėje galaktikų masės ir skersmenys pateikti neatsižvelgus į nematomąją medžiagą.

8.1.1. Spiralinės galaktikos

Tai sudėtingos struktūros didžiulės žvaigždžių ir tarpžvaigždinės bei nematomosios medžiagos sistemos, kurių fotografiniuose arba elektroniniais prietaisais gautuose vaizduose pirmiausiai pamatome skaisčiai švytintį maždaug rutulio ar elipsoido formos ***centrinį telkinį,*** arba ***baldžą,*** ir nuo jo vienoje plokštumoje nusitęsusias ***spiralines vijas***. Jos dažniausiai esti dvi, atsiskiriančios nuo centrinio telkinio priešingose pusėse ir, toldamos nuo jo, 1–2 kartus jį apvyniojančios. Trumpesnių spiralinių vijų atkarpų bei įvairių jų atsišakojimų gali būti ir daugiau. Atidžiai tyrinėjant įsitikinama, kad spiralinės vijos tėra toje pačioje, vadinamojoje ***pagrindinėje***, arba ***simetrijos***, ***plokštumoje***



8.1 pav. *Spiralinė galaktika (Sc) M 101, arba NGC 5457, Grįžulo Ratų žvaigždyne*

nutįsusio ***disko*** skaisčiau šviečiančios dalys. Centrinį telkinį gaubiančiam diskui priklauso ir spiralinės vijos, ir tarpai tarp jų. Tačiau tarpai šviečia daug silpniau už spiralines vijas, ir todėl sunkiai įžiūrimi, vijų švytėjimo neužmaskuoja. Centrinį telkinį ir diską iš abiejų pusių gaubia storesnė ar plonesnė aureolė, kurios silpną švytėjimą labai sunku ar beveik neįmanoma susekti. Tai vadinamasis ***sferoidas***. Jo nereikia painioti su tamsiuoju vainiku, sudarytu iš hipotetinės nematomosios medžiagos. Pastarasis tęsiasi dar daug toliau.

Spiralinių galaktikų diskus bandoma išskirti į dvi dalis – ***plonąjį diską*** ir ***storąjį diską***. Spiralinės vijos ir tarpai tarp jų sudaro plonąjį diską. O storasis diskas apgaubia plonąjį iš abiejų šonų ir tuo būdu užima tarpinę padėtį, padaro ne tokį griežtą perėjimą tarp plonojo disko ir sferoido. Tačiau aiškios ribos tarp abiejų diskų nėra, ta riba daugiau sąlyginė. Taip pat ji priklauso ir nuo galaktikos savitumų. Vienose spiralinėse galaktikose ji aiškesnė, o kitose jos praktiškai nėra, diskas atrodo vieningas.

Spiralinės galaktikos skirstomos į keturis poklasius: ***Sa***, ***Sb***, ***Sc*** ir ***Sd***. Įvairių poklasių S galaktikų nuotraukos parodytos **8.1–8.6** pav. Sa poklasio galaktikų spiralinės vijos visai menkos, o centrinis telkinys stambus. Sc poklasio galaktikų centrinis telkinys visiškai menkutis, o spiralinės vijos labai storos ir skaisčios, plačiau išsiskleidusios ir mažiau taisyklingos, kartais sutrūkinėjusios. Sb galaktikų išvaizda yra tarpinė. Sd galaktikose beveik



8.2 pav. *Spiralinė galaktika (Sc) M 74, arba NGC 628, Žuvų žvaigždyne. Spiralinėse vijose matomi didesnio skaisčio mazgai yra audringos žvaigždėdaros sritys. Labai stipriai šviečia jaunos masyvios žvaigždės ir jų L_S spindulių jonizuoti debesys. Centriniame telkinyje irgi formuojasi daug naujų žvaigždžių*



8.3 pav. *Spiralinė galaktika (Sb) Verpstas, arba NGC 4565, Berenikės Garbanų žvaigždyne. Silpno sferoido švytėjimo nuotraukose neįmanoma užfiksuoti. Tamsus brūkšnelis išilgai disko – perspektyvoje susiliejančių tamsių tarpžvaigždinės medžiagos debesų darinys*

visiškai nematyti centrinio telkinio, o vien tik stipriai šviečiančios storos spiralinės vijos, labai išsiskleidusios, mazguotos, sutrūkinėjusios ir išsišakojusios.

Beveik kas antra spiralinė galaktika turi ***skersę*** – šviečiančią cilindro pavidalo žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos juostą, einančią per centrinį telkinį ir gana toli nutįsusią į abi puses nuo jo. Spiralinės vijos prasideda nuo skersės galų. Tai vadinamosios ***spiralinės skersinės galaktikos*** (angl. *spiral barred galaxies*), žymimos ***SBa***, ***SBb***, ***SBc***, ***SBd*** (**8.7** pav.). Dažnai SBa galaktikų vidinė spiralinė vija sudaro uždarą žiedą.

Mūsų Galaktika taip pat priklauso spiralinių galaktikų klasei. Tradiciškai ji būdavo priskiriama Sb arba Sbc poklasiui, nors turi ir daug savitumų. Pavyzdžiui, jos spiralinės vijos gerokai susipainiojusios. Tačiau kyla abejonių, ar nebūtų tiksliau ją priskirti prie spiralinių skersinių galaktikų. Yra nuomonių, kad ji turi nedidelę skersę.

Jei spiralinę galaktiką stebime ne iš viršaus (statmenai pagrindinei plokštumai), o iš briaunos, spiralinės vijos projektuojasi viena ant kitos ir susilieja į švytinčią, per vidurį pastorėjusią juostelę. Pastorėjimą sukelia ***centrinis telkinys***. Išilgai švytinčios juostelės matosi tamsus ruoželis. Tai perspektyvoje susilieję dujų ir dulkelių mišinio debesys, kurių daug spiralinių galaktikų pagrindinės plokštumos aplinkoje, ypač spiralinėse vijose. Žvaigždžių ir emisi-



8.4 pav. *Spiralinė galaktika (Sb) NGC 891 Andromedos žvaigždyne*

nių ūkų šviesos nepraleidžia difuziniuose ir molekuliniuose debesyse esančios dulkelės. Jei spiralės matomos, tai užtemdančios medžiagos juostelės gali tęstis išilgai skersės ir išilgai spiralinių vijų, daugiausia ties vidine vijų puse.

Spiralinių galaktikų sferoido ir disko žvaigždės tarpusavyje skiriasi savo amžiumi ir nuo jo priklausančia chemine sudėtimi bei savo orbitų apie galaktikos centrą parametrais.

Dauguma sferoido žvaigždžių yra labai senos, net 11–14 milijardų metų amžiaus. Taigi jos sudarytos iš tokios statybinės medžiagos, kuri dar labai mažai tepraturtinta už helį sunkesniais cheminiais elementais. Jų šiose žvaigždėse tėra kelis, keliasdešimt ar net per šimtą kartų mažiau negu Saulėje ([Fe/H] < –0,5 arba net [Fe/H] < –2,0). Tokios žvaigždės vadinamos ***nemetalingosiomis žvaigždėmis***.

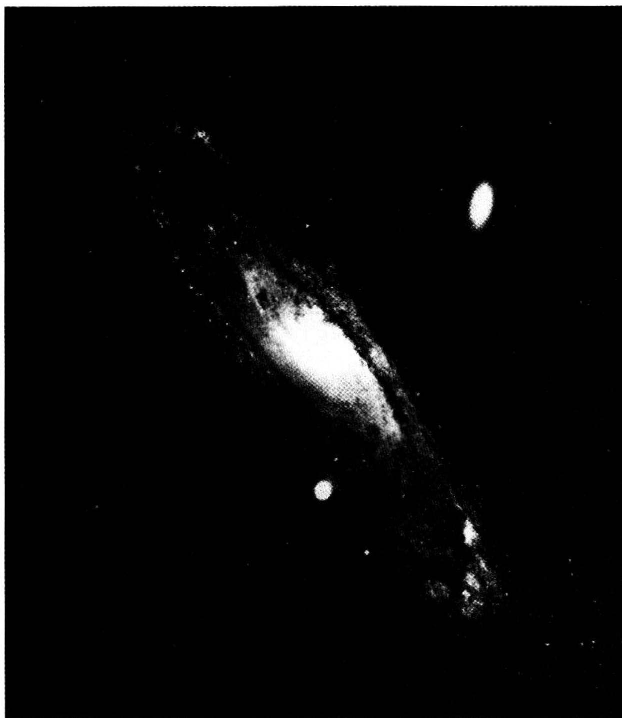
Plonajame diske visiškai neaptinkame žvaigždžių, kurių amžius didesnis nei 10–12 milijardų metų. Atrodo, kad čia mažoka ir tokių žvaigždžių, kurios gimė prieš 8–10 milijardų metų. Dauguma jų yra daug jaunesnės. O spiralinėse vijose (kaip išimtys ir tarpuose tarp vijų) yra ir visiškai jaunų, ką tik susiformavusių ar dar besiformuojančių žvaigždžių. Beveik visų (išskyrus pačias seniausias) plonojo disko žvaigždžių cheminė sudėtis panaši į Saulės cheminę sudėtį. Jos vadinamos ***normalios cheminės sudėties žvaigždėmis***. O negausios pačios seniausios čia aptinkamos žvaigždės už helį sunkesniais elementais praturtintos kelis kartus mažiau negu Saulė (maždaug – 0,6 < [Fe/H] < 0).



8.5 pav. *Spiralinė galaktika (Sa) Sombreras, arba M 104, arba NGC 4594, Mergelės galaktikų spiečiuje. Iš briaunos matyti ne tik diskas bei centrinis telkinys, bet ir vidinė sferoido dalis*

Sferoido žvaigždžių orbitos labai sudėtingos. Jos nėra nei plokščios, nei uždaros kreivės. Tačiau, imant apytiksliai, jos panašios į labai ištęstas elipses, kurios pačios dar sukasi savo plokštumose, o ir plokštumos neišlieka pastovios. Elipsės vienas židinys yra pastovus – jame galaktikos masės centras. O antrasis židinys slenka erdvėje. Orbitų plokštumos labai įvairios. Kuo mažiau jos glaudžiasi prie pagrindinės plokštumos, tuo mažiau susiplojusio elipsoido tūrį užima tokių žvaigždžių visuma. Šitaip judančios žvaigždės vadinamos ***antrosios populiacijos žvaigždėmis***. Lygiai taip pat apie spiralinių galaktikų centrus skrieja ir seni kamuoliniai spiečiai. Vadinasi, jie irgi yra II populiacijos objektai.

Plonojo disko žvaigždžių orbitos, griežtai kalbant, taip pat nėra nei uždaros, nei plokščios kreivės. Jos panašios į visiškai mažai ištęstas elipses, kurios dar iš lėto kinta. Tačiau apytiksliai galima tarti, kad plonojo disko žvaigždės apie galaktikos centrą skrieja beveik apskritimais ir visos beveik vienoje plokštumoje, taip pat jos dar švytuoja apie tą plokštumą. Kuo mažiau orbitų plokštumos viena nuo kitos skiriasi, tuo plonesnį diską sudaro tokių žvaigždžių visuma. Šitaip judančios žvaigždės vadinamos ***pirmosios populiacijos žvaigždėmis***. Šiai populiacijai spiralinėse galaktikose dar priklauso ir kiti plonojo disko objektai – padrikieji žvaigždžių spiečiai, žvaigždžių asociacijos, tarpžvaigždinės medžiagos debesys.



8.6 pav. *Spiralinė galaktika (Sb) Didysis Andromedos ūkas, arba tiesiog Andromedos galaktika, arba M 31, arba NGC 224. Jos pagrindinė plokštuma su regėjimo kryptimi sudaro 15^{o} kampą. Dešiniau M 31 matyti daug mažesnė jos palydovė – skersėtoji lęšinė galaktika (SB0) NGC 205. Kita M 31 palydovė kaip skaisti beveik apvali dėmė projektuojasi į M 31 kairįjį pakraštį. Tai elipsinė galaktika (E2) M 32, arba NGC 221. Šios trinarės sistemos duomenys pateikti* **22** *lentelėje*

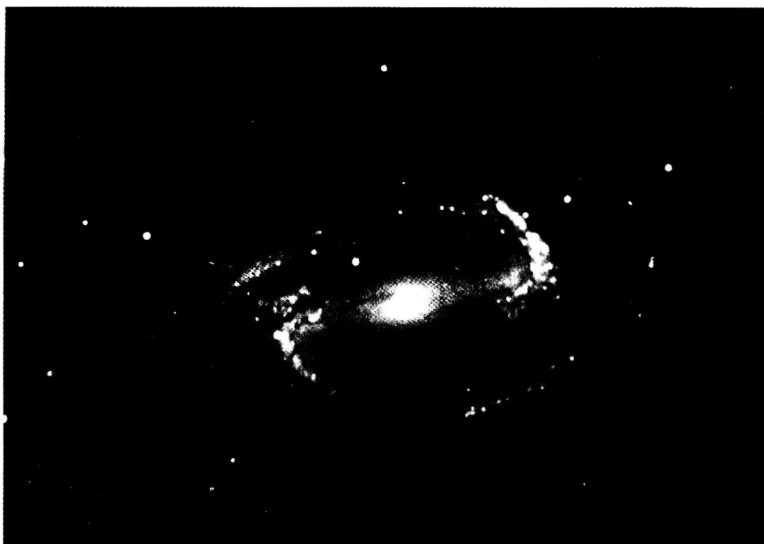
Skriedamos savo orbitomis, disko tūryje ilgesniam ar trumpesniam laikui atsiduria ir II populiacijos žvaigždės. Tačiau čia jų maža.

Storasis diskas dar per mažai ištirtas. Galbūt jo žvaigždės ir kamuoliniai spiečiai ne tik judėjimo ypatybėmis, bet ir amžiumi bei chemine sudėtimi yra tarpinės tarp sferoido ir plonojo disko žvaigždžių.

Į centrinį telkinį yra susispietusios ne tik mažų orbitų žvaigždės, kurios iš čia niekada neištrūksta. Čia bent neilgai buvoja kiekvienas II populiacijos objektas, dėl savo orbitos ištęstumo atlėkdamas net iš pačios sferoido periferijos ir dideliu greičiu praskriedamas netoli galaktikos centro.

Centrinį telkinį užpildo ne tik senovinės, nemetalingosios žvaigždės. Dar daugiau čia yra ir vidutinio bei jauno amžiaus normalios cheminės sudėties žvaigždžių, kurios skrieja tiek apskritomis, tiek įvairiu mastu ištęstomis mažomis orbitomis. Yra ir visiškų naujagimių.

S galaktikose dauguma kamuolinių spiečių priklauso sferoidams ir yra seni



8.7 pav. *Spiralinė skersinė galaktika (SBb) NGC 1300 Eridano žvaigždyne*

II populiacijos objektai. Jie labai ryškiai koncentruojasi į savųjų galaktikų centrus, todėl jų ypač gausu centriniuose telkiniuose. Šiek tiek kamuolinių spiečių esti ir storuosiuose diskuose.

Padrikieji spiečiai priklauso I populiacijai. Jie aptinkami S galaktikų diskuose ir centriniuose telkiniuose.

Tarpžvaigždinės medžiagos debesys susigrūdę ir į centrinį telkinį, ir į diską, ypač į diskui priklausančias spirales. Sferoide jų visai mažai. O labai retos, užtat karštos vainikinės dujos kaip ištisinis, nors ir nevienodo tankio kontinuumas užpildo ne tik centrinio telkinio bei disko, bet, matyt, ir beveik visą sferoido tūrį. Iš viso tarpžvaigždinė medžiaga spiralinėse galaktikose sudaro nuo kelių iki keliolikos procentų visos galaktikos žvaigždžių masės.

Visą galaktikos tūrį užpildo magnetinis laukas. Tik diske, o ypač spiralinėse vijose, jis daug stipresnis negu sferoide. O kur plyti magnetinis laukas, ten spiralėmis apie jo linijas skrieja ir kosminių spindulių dalelės, kurių komponentas – reliatyvistiniai elektronai – skleidžia sinchrotroninės kilmės radijo bangas.

Spiralinės vijos išryškėja disko fone ne tiek dėl truputį didesnio žvaigždinio tankio, kiek dėl to, kad ten, be senesnių žvaigždžių, yra ir visiškai jaunų, tiesiog naujagimių. Juk ***žvaigždėdaros*** (žvaigždžių susidarymo) židiniai šiuo metu tėra beveik vien tik molekulinių debesų didžiausio tankio vietose. O tokie debesys bei jų kompleksai normaliose spiralinėse galaktikose pastebimi beveik vien tik spiralinėse vijose ir galaktikų centrų artimesnėse ar tolimesnėse aplinkose. Diske tarpuose tarp spiralinių vijų jie pasitaiko retai.

Tarp naujagimių žvaigždžių esti ir pačių masyviausių O bei B spektrinių klasių pagrindinės sekos žvaigždžių, kurios ne tik pačios šviečia tūkstančius ar šimtus tūkstančių kartų galingiau nei Saulė, bet ir sukelia emisinių ūkų švytėjimą. Dėl savo jauno amžiaus iš spiralinių vijų taip pat dar nespėjusios išsiskirstyti baltosios, geltonosios bei raudonosios supermilžinės. Visa tai ir išryškina spiralines vijas.

Plonajame diske tarpus tarp spiralinių vijų užpildo taip pat normalios cheminės sudėties I populiacijos žvaigždės, tačiau jau senesnės negu vijose, nebe naujagimės. Todėl tarp jų beveik nebėra O bei ankstyvųjų B poklasių žvaigždžių. Dar daugiau – šios žvaigždės dažniausiai jau spėjusios pabuvoti ir raudonosiomis supermilžinėmis bei virsti neutroninėmis žvaigždėmis ar net juodosiomis bedugnėmis (juodosiomis skylėmis). Todėl diske tarpuose tarp spiralinių vijų esanti viena žvaigždė vidutiniškai yra daug kartų mažesnio šviesio negu vidutiniškai viena vijų žvaigždė.

Dar vidutiniškai daug kartų mažesnio šviesio yra viena sferoido žvaigždė. Taigi sferoidas labai blausiai švyti ir dėl labai mažo žvaigždinio tankio ir dėl labai mažo vidutinio žvaigždžių šviesio. Ir atvirkščiai – centrinis telkinys šviečia labai skaisčiai dėl labai didelio žvaigždinio tankio, taip pat dėl ten nors ir negausiai pasitaikančių ypač didelio šviesio žvaigždžių bei emisinių ūkų.

Galbūt prie centrinio telkinio švytėjimo prisideda ir galaktikų centrų aktyvumo reiškiniai. Apie vadinamąsias aktyviąsias galaktikas kalbėsime **8.4** poskyryje. Stebimi silpni aktyvumo reiškiniai ir paprastų, neaktyviųjų galaktikų (pavyzdžiui, mūsų Galaktikos) centruose.

Kiekvienas plonajame diske esantis I populiacijos objektas turi labai didelį judesio kiekio momentą galaktikos centro atžvilgiu, nes skrieja beveik apskritimu, kurio spindulys r ir linijinis greitis v yra labai dideli. Jie visi gana tvarkingai skrieja ta pačia vyraujančia kryptimi. Todėl atskirų žvaigždžių, padrikųjų spiečių, asociacijų, tarpžvaigždinės medžiagos debesų judesio kiekio momentai susisumuoja. Susidaro didžiulis viso plonojo disko judesio kiekio momentas. Galima sakyti, kad visas plonasis diskas sukasi apie ašį, kuri eina per galaktikos centrą ir yra statmena pagrindinei galaktikos plokštumai.

Tiesa, plonasis diskas sukasi ne taip, kaip kietas kūnas. Plonojo disko objektų orbitiniai greičiai įvairiuose nuotoliuose nuo galaktikos centro smarkiai skiriasi tarpusavyje – nuo keliasdešimties iki daugiau kaip 300 km/s. Jų priklausomybė nuo orbitos spindulio yra gana sudėtinga. Pagal ją nustatoma spiralinių galaktikų masė ir jos pasiskirstymas galaktikos viduje.

Sferoido judesio kiekio momentas visiškai mažas. Juk sferoido žvaigždės ir kamuoliniai spiečiai dėl savo orbitų ištęstumo vos ne pusę savo apskriejimo periodo krinta galaktikos centro link, o beveik kitą pusę – nuo jo tolsta. Taigi sferoidas, kaip visuma, beveik nesisuka apie galaktikos centrą. Centrinio telkinio judesio kieko momentas irgi daug mažesnis už disko judesio kiekio momentą.

8.1.1.1. Mažo skaisčio, arba anemiškosios, spiralinės galaktikos

Jos žymimos simboliu ***LSB*** (angl. *low surface brightness galaxies* – silpno paviršinio šviesumo galaktikos). Tai – galaktikos, kurių regimojo paviršiaus vienetinio kampinio ploto, pavyzdžiui, vienos kvadratinės kampinės sekundės, spindesys yra keliolika, kelis šimtus ar net kelis tūkstančius kartų mažesnis už atitinkamą „normalių" galaktikų spindesį. Kaip žinome, regimojo paviršiaus vienetinio kampinio ploto spindesys nepriklauso nuo nuotolio ir yra proporcingas tiriamojo spinduolio skaisčiui (spinduolio paviršiaus projekcijos į stebėjimo krypčiai statmeną plokštumą vienetinio ploto, pavyzdžiui, 1 m^2 spinduliavimo galiai vienetiniame erdviniame kampe). Taigi LSB galaktikos yra labai mažo skaisčio, labai blankios, o tai reiškia, kad jų vienetinis tūris labai silpnai spinduliuoja. Vadinasi, tokiose galaktikose labai mažas žvaigždinis tankis, tai yra žvaigždės ten daug toliau viena nuo kitos negu „normaliose" galaktikose. Taip pat galbūt ten jau užgesusi arba nusilpusi žvaigždėdara, ir dėl to trūksta jaunų labai karštų ir galingų žvaigždžių – prožektorių, kurios ne tik pačios stipriai šviečia, bet ir suteikia energiją emisinių ūkų švytėjimui.

Aišku, kad anemiškąsias galaktikas labai sunku aptikti ir stebėti, nes švyti daug blausiau už naktinį dangaus foną. Pro jas kartais gali net laisvai prasišviesti tolimesnės „normalaus" skaisčio galaktikos. Gali pasitaikyti, kad stebėdami tokią prasišvietusią tolimą galaktiką mes net neįtariame, jog jos priekyje yra mūsų kol kas dar neaptikta mažo žvaigždinio tankio galaktika – vaiduoklis.

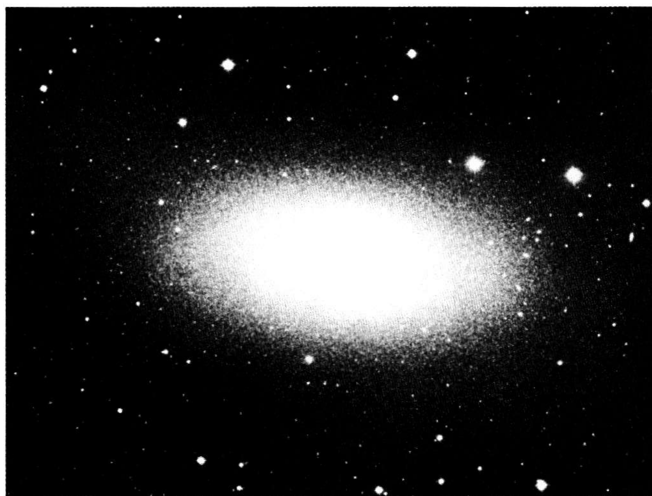
Nenuostabu, kad apie spiralinių LSB galaktikų egzistavimą sužinota tik maždaug prieš penkiolika metų, observatorijose pradėjus masiškai naudoti didelio jautrumo CCD imtuvus. Paaiškėjo, kad tokių vaiduokliškų galaktikų esama labai daug, gal net daugiau negu „normalių" spiralinių galaktikų. Jos yra labai įvairios masės ir didumo. Jų dauguma turėtų būti nykštukinės, visai mažos masės. Nemažai rasta ir panašios masės kaip mūsų Galaktika. Šiuo atveju anemiškoji galaktika yra kelis kartus didesnio skersmens. O pačios masyviausios LSB spiralinės galaktikos yra kelis kartus masyvesnės už masyviausias „normalias" spiralines galaktikas. Pavyzdžiui, pati didžiausia iki šiolei žinoma LSB galaktika Malin 1, aptikta už 270 Mpc nuo mūsų Mergelės žvaigždyno kryptimi, yra 10 kartų masyvesnė ir net 6 kartus didesnio skersmens už Paukščių Tako galaktiką. Jei ji atsidurtų vos už 0,7 Mpc nuo mūsų, kaip Andromedos galaktika, tai dangaus skliaute nusidriektų net per 20° (40 Mėnulio skersmenų). Tačiau tuomet galbūt net pro teleskopus ji liktų nematoma, visiškai persišviečianti. Juk ypač mažo skaisčio objekto buvimą lengviau užčiuopti tuomet, kai jo vaizdas yra visiškai mažo regėjimo kampo ir neužima viso CCD imtuvo regėjimo lauko. Taigi aptikti tolimesnes LSB galaktikas kartais yra net lengviau negu artimesnes.

Spiralinės LSB galaktikos dar mažai ištirtos. Panašu, kad jos turi ypač didelius judesio kiekio momentus, didesnius negu tokios pat masės „normaliosios“ galaktikos. Manoma, kad didesnis judesio kiekio momentas, taigi greitesnis sukimasis apie ašį ir nulėmė besiformuojančių būsimųjų spiralinių LSB galaktikų didesnį tūrį ir mažesnį žvaigždinį tankį bei skaistį.

Toli gražu ne visas mažo skaisčio galaktikas galima priskirti spiralinių galaktikų klasei. Atrodo, kad dar daugiau esama mažos masės ir mažo žvaigždinio tankio bei skaisčio nykštukinių galaktikėlių, neturinčių nieko panašaus į spiralinę struktūrą. Kai kurios iš jų yra visiškai čia pat – mūsų Galaktikos, taip pat ir Andromedos galaktikos palydovės. Jos ir atrastos buvo daug anksčiau už spiralines LSB galaktikas. Savo struktūra vienos jų artimesnės elipsinėms, o kitos netaisyklingosioms galaktikoms. Apie jas dar kalbėsime atitinkamuose **8.1.2** ir **8.1.3** skirsneliuose. Kol kas dar tvirtai nežinome, ar LSB galaktikose bei jų aplinkose esama nematomosios medžiagos.

8.1.1.2. Lęšinės galaktikos

Spiralinėms arba skersinėms spiralinėms galaktikoms giminingos vadinamosios ***lęšinės galaktikos*** (angl. *lenticular galaxies*), žymimos ***SO*** ir ***SBO***. Jos primena S galaktikas, tačiau neturi pačių spiralių, taip pat tarpžvaigždinės medžiagos. Jos turi centrinį telkinį, diską ir, matyt, sferoidą. Tokių galaktikų daug vadinamuosiuose kamuoliniuose galaktikų spiečiuose (žr. **8.5.3**). Manoma, kad tai buvusios S arba SB galaktikos, netekosios tarpžvaigždinės



8.8 pav. *Lęšinė skersinė galaktika (SB0) NGC 205. Tai Andromedos galaktikos M 31 palydovė. Jos pakraščiai palyginti aiškiai apriboti – iš žvaigždžių sudaryta palaipsniui retėjanti aureolė nėra didelė. Gretima supermilžiniška galaktika M 31 savo trauka nuplėšė šią aureolę. Panašu, kad didžiosios kaimynės paveikta NGC 205 kaip tiktai ir virto lęšine skersine galaktika*

medžiagos ir dėl to nebeturinčios naujagimių žvaigždžių. Todėl spiralinės vijos nebeišsiskiria iš disko fono (žr. **8.8** pav.).

Manoma, kad S0 ir SB0 galaktikos savo tarpžvaigždinę medžiagą prarado susidurdamos su kitomis galaktikomis arba su didžiuliais retų dujų telkiniais, kurie kaupiasi galaktikų spiečių centrinėse dalyse. Galaktikos susidurdamos arba susilieja, arba iškrinka, gali suskilti į kelias deformuotas galaktikas bei žvaigždžių debesis. Kartais gali net pereiti viena per kitą. Tarpžvaigždinė medžiaga susidurdama labai susispaudžia, per ją nusirita smūginės bangos. Dalis suspaustos medžiagos greitai virsta žvaigždėmis. Kita dalis labai įkaista, išlekia iš galaktikos ir papildo tarpgalaktinę medžiagą.

Maždaug tą patį galėtų padaryti ir supernovų sprogimų sukeltos smūginės bangos. Tačiau šiuo atveju supernovos turėjo sprogipėti daug dažniau negu rodo dabartiniai stebėjimai. Pagaliau tarpžvaigždinės medžiagos galaktika gali nebeturėti ir todėl, kad ji jau anksčiau yra suspėjusi virsti žvaigždėmis.

8.1.2. Elipsinės galaktikos

Tai maždaug rutulio ar elipsoido (dažniausiai triašio ar sudėtingesnio), kartais net storo ir trumpo pieštuko ar beveik lęšio formos iš pirmo žvilgsnio atrodančios gana vientisos žvaigždžių sistemos. Pagal tai, kiek pailgi jų vaizdai, elipsinės galaktikos skirstomos į aštuonis poklasius: nuo ***E0*** (skritulio formos vaizdai) iki ***E7*** (labai pailgi, beveik lęšio formos vaizdai). E galaktikų pavyzdžiai parodyti **8.9**, **8.10** ir **8.12** pav. Kai kurios geriau ištirtos E

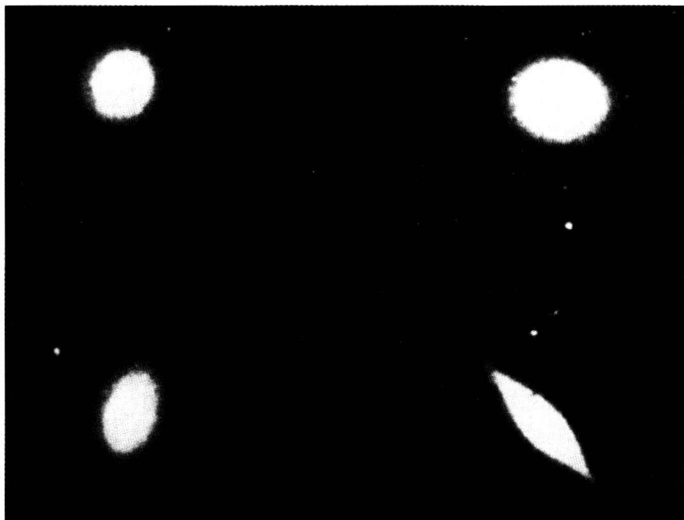


8.9 pav. *Elipsinė galaktika (E4) M 49, arba NGC 4472, Mergelės spiečiuje*

galaktikos rodo nevienalytę vidaus sandarą. Panašu, kad čia yra susidūrusios ir jau beveik susiliejusios dvi galaktikos, tačiau dar nesuspėjusios visiškai suvienodinti savo žvaigždžių judėjimo ir pasiskirstymo. Kaip matome iš **21** lentelės, elipsinių galaktikų masės, skersmenys ir šviesiai labai skirtingi.

Kai kurios nykštukinės elipsinės galaktikos nedaug masyvesnės už kamuolinius spiečius. Jos paprastai žymimos simboliu ***dE***. Tačiau kai kurie autoriai tuo pačiu simboliu dE žymi ir vadinamąsias ***nykštukines sferoidines galaktikas*** dažniausiai žymimas d*Sph* (*angl. dwarrf sferoidal galaxies*), kurios savo žvaigždžių skaičiumi nedaug tepralenkia kamuolinius spiečius, tačiau jų skersmenys kelis ar keliasdešimt kartų didesni negu pastarųjų. Vadinasi, jose nepaprastai mažas žvaigždinis tankis. Tuo būdu jos irgi yra mažo skaisčio arba LSB galaktikos, kaip ir **8.1.1.1** skirsnelyje aprašytosios spiralinės LSB galaktikos. Daugelis žinomų dSph nykštukinių galaktikų yra visiškai arti – tai mūsų Galaktikos ir Andromedos galaktikos palydovės. Jos matomos ne kaip švytinčios dėmelės, o kaip atskirų silpnučių žvaigždžių lizdai (žr. **8.11** pav.). Dėl to jos ir atrastos daug ankščiau už spiralines LSB galaktikas: jų atradimo istorija prasidėjo 1935 m. Griežtos ribos tarp dE ir dSph galaktikų nėra. Yra ir pereinamojo pobūdžio objektų.

Galaktikų spiečių centruose randamos ypač masyvios ir šviesios supermilžiniškos E galaktikos, kurias gaubia silpnai švytinti aureolė, nusitęsusi net iki kelių šimtų kpc. Jos dar vadinamos ***cD galaktikomis***. Manoma, kad tai galaktikos – kanibalai, jos dėl savo stiprios traukos, kurią sukelia didelė masė, yra užgrobusios daug buvusių kitų galaktikų (žr. **8.12** pav.).



8.10 pav. *Elipsinių galaktikų pavyzdžiai. Viršuje kairėje – NGC 3379 (E0), viršuje dešinėje – M 32, arba NGC 221 (E2), apačioje kairėje – M 59, arba NGC 4621 (E5), ir apačioje dešinėje – NGC 3115 (E7)*



8.11 pav. *Nykštukinė sferoidinė galaktika (dSph 3, arba dE 3) Leo I (Liūto I), danguje randama vos 20′ šiauriau Regulo (Liūto α). Tai viena iš tolimesniųjų mūsų Galaktikos palydovių, esanti už 280 kpc. Joje tėra keli milijonai žvaigždžių, nors skersmuo siekia 1,5 kpc. Toks nepaprastai mažas žvaigždinis tankis būdingas visoms dSph galaktikėlėms*

Visos dE ir dSph galaktikų žvaigždės yra tokios pat labai senos ir taip pat arba beveik taip pat stokojančios už helį sunkesnių elementų kaip ir spiralinių galaktikų II populiacijos žvaigždės. O vidutinėse ir masyviose E galaktikose jau yra susimaišiusios nemetalingosios senos, vyresnės kaip 10^{10} metų amžiaus žvaigždės ir apysenės, maždaug 6–9 milijardų metų amžiaus žvaigždės, kuriose už helį sunkesnių elementų jau yra vos 2–3 kartus mažiau arba visiškai tiek pat, kiek Saulėje. Masyviose E galaktikose gausu ir vidutinio amžiaus (3–6 milijardų metų) žvaigždžių, savo metalų kiekiu jau prilygstančių Saulei arba ją ir šiek tiek pralenkiančių. Ir štai pačiose masyviausiose supermilžiniškose elipsinėse galaktikose senovinės nemetalingosios žvaigždės jau visiškai nustelbtos. Pagrindinę tokios galaktikos švytėjimo dalį sukuria jau Saulės metalingumo arba ir už ją kelis kartus metalingesnės apysenės ir vidutinio amžiaus raudonosios milžinės.

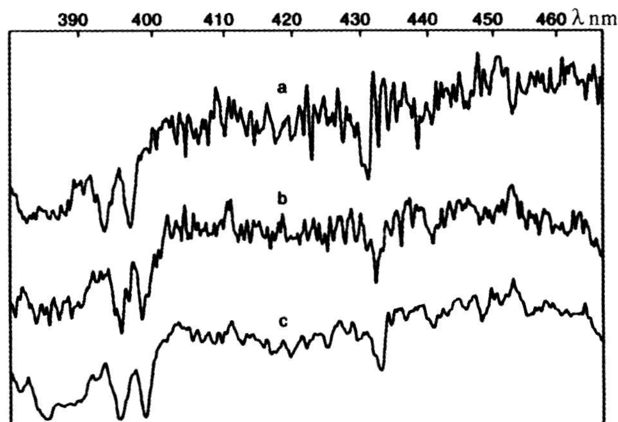
Reikia pabrėžti, kad vidutinių, o ypač masyvių E galaktikų (kaip ir spiralinių, išskyrus M 31 ir M 33 galaktikas) žvaigždžių cheminę sudėtį įvertinti galima tik labai apytiksliai. Mat tik vienintelė vidutinė E galaktika tėra pakankamai arti, kad būtų galima tyrinėti nemažai jos atskirų žvaigždžių. Tai Didžiojo Andromedos ūko (M 31) palydovė, žymima M 32 arba NGC 221. Iki jos, kaip ir iki M 31, tėra 0,7 Mpc. Visos kitos vidutinės ir visos masyvios E galaktikos yra daug toliau. Jose atskiros žvaigždės arba visai neišskiriamos, arba jų išskiriama mažai ir nepakankamai kokybiškai, todėl daugybės



8.12 pav. *Supermilžinė elipsinė (cD poklasio) radijo galaktika 3C 274, arba Mergelės A, arba M 87, arba NGC 4486, Mergelės galaktikų spiečiaus centre. Jos masė apie 40 kartų didesnė už mūsų Galaktikos masę. Skaisčiai švytinčios centrinės dalies skersmuo siekia 20 kpc, o blausios periferijos skersmuo – net 120 kpc. Tai galaktika – kanibalė, į kurią jau yra nemažai įkritusių kitų, menkesnių galaktikų. Joje esama apie 10 000 kamuolinių žvaigždžių spiečių, kurių dalis matosi ir šiame paveiksle (išskyrus centrinę dalį, kur viskas susilieję). Hablo kosminio teleskopo duomenys leidžia galvoti, kad galaktikos centre yra supermasyvi 3 milijardų saulių masės juodoji bedugnė*

atskirų žvaigždžių cheminės sudėties analizės vis tiek negalima padaryti. Tenka analizuoti suminį visos galaktikos arba atskirų jos dalių spektrą.

Taip pat pritaikomas ir fotometrinis metodas. Šiuo atveju matuojami visos galaktikos arba jos atskirų dalių specialiai parinkti spalvos rodikliai. G ir vėlesnių spektrinių klasių žvaigždžių atveju Gamta suteikė dvi principines galimybes fotometriškai įvertinti metalų ir kitų už helį sunkesnių elementų kiekį. Viena galimybė – tai matuoti žvaigždžių skleidžiamos energijos kreivės pažemėjimus, atsiradusius kai kuriose kreivės vietose dėl gausių praktiškai susiliejusių sugerties linijų (blanketavimas). Kuo gausiau žvaigždėse metalų, tuo ryškesni tokie pažemėjimai. Kita galimybė – tai bandyti pasinaudoti tuo faktu, kad kuo žvaigždė metalingesnė, tuo jos gelmės mažiau skaidrios, tuo sunkiau į paviršių prasiveržti spindulių energijai. Dėl to tokios žvaigždės savo evoliucijos trečiajame etape, raudonųjų milžinių stadijoje, esti labiau išsipūtusios, taigi vėsesnės ir raudonesnės. Tai gali parodyti kai kurie temperatūrai jautrūs spalvos rodikliai, tarp jų ir *B–V*. Tačiau šias abi galimybes labai painioja fotometrijos rezultatų priklausomybė ne tik nuo žvaigždžių metalingumo, bet ir nuo jų amžiaus, šviesio, masės. Labiausiai naudojamas



8.13 pav. *Žvaigždės ir galaktikos spektrų palyginimas: a) oranžinės milžinės KO III spektrinės klasės žvaigždės HR 5709 spektras, b) ir c) supermilžiniškos elipsinės galaktikos M 87 (dar žr.* **8.12** *ir* **8.17** *pav.) dviejų skirtingų vietų spektrai. Viršuje surašyti bangų ilgiai nanometrais. Spektrų panašumas rodo, kad milžiniškų elipsinių galaktikų didžiąją šviesos dalį sukuria normalios cheminės sudėties geltonosios ir raudonosios milžinės, jau pabėgusios iš HR diagramos pagrindinės sekos*

metodas – žvaigždžių vidutinės energijos kreivės pažemėjimo ties 510–520 nm matavimas. Šį pažemėjimą sukuria Mg I žaliasis tripletas ir daug kitų menkesnių sugerties linijų, taip pat magnio hidrido MgH sugerties juosta. (Kaip tiktai ties šia vieta yra matuojamas Vilniaus astrofotometrinės sistemos ryškis *Z*.) Panoraminių šviesos imtuvų CCD (krūvių sąsajos įtaisų) panaudojimas leidžia tiriamąją galaktiką (ne tik elipsinę, bet ir kitokią) suskaldyti į daugybę sričių ir kompiuteryje gauti kiekvienos atskiros srities žvaigždžių vidutinius fotometrinius duomenis. Tiriant tolimesnes galaktikas, nereikia užmiršti, kad egzistuoja vadinamasis raudonasis poslinkis: Visatos plėtimasis padidina registruojamų elektromagnetinių bangų ilgius (žr. **8.3.2**).

Elipsinėse galaktikose, priešingai negu spiralinėse, beveik nebėra didelių tarpžvaigždinės medžiagos telkinių, kuriuose galėtų tęstis žvaigždėdaros procesas. Vadinasi, beveik nebėra ir naujagimių žvaigždžių, iš kurių masyviausios, greitai tapdamos O ir B spektrinių klasių pagrindinės sekos žvaigždėmis, galėtų labai sustiprinti žvaigždėdaros sričių švytėjimą, taip pat joms suteikti melsvesnę spalvą, sumažinti jų spalvos rodiklius. Manoma, kad nykštukinės dE ir dSph galaktikos žvaigždžių statybinę medžiagą prarado daugiau nei prieš 10^{10} metų. Stambiose E galaktikose ji beveik pasibaigė prieš 2–5 milijardus metų.

Tiesa, mažą dalį buvusios statybinės medžiagos žvaigždžių vėjas (iš žvaigždžių lekiantys greitų elektringų dalelių srautai) ir supernovų sproginėjimai nuolat vėl grąžina atgal į tarpžvaigždinę erdvę. Nykštukinėse dE bei dSph galaktikose dėl gravitacinio lauko silpnumo ši labai negausi ir labai mažo

tankio difuzinė medžiaga neišsilaiko – ją iš galaktikos išmeta net ir negausių supernovų sukeltos smūginės bangos. Iš vidutinės masės E galaktikų ją iššluoja galaktikų susidūrimai tarpusavyje ir su tarpgalaktiniais dujų debesimis (jeigu jų pasitaiko) arba tiesiog labai retų tarpgalaktinių dujų srautas, susidarantis tada, kai galaktika ir aplinkinis ištisinis tarpgalaktinis dujų kontinuumas juda labai skirtingais greičiais, kitaip sakant, kai galaktika skrodžia ištisinį dujų kontinuumą. Taip gali būti galaktikų spiečiuose. Stambios E galaktikos, matyt, nepraranda naujai atsirandančios difuzinės medžiagos, ir iš jos galbūt ir dabar tebesusidarinėja naujos žvaigždės, tačiau jų taip maža, kad jos tiesiog lieka nustelbtos ir nepastebimos labai gausių senų (keliolikos milijardų metų amžiaus), o ypač vidutinių (kelių milijardų metų amžiaus) žvaigždžių glaudžioje apsuptyje.

Visų elipsinių galaktikų žvaigždės – tiek pačios seniausios nemetalingosios, tiek ir vidutinio amžiaus normalios cheminės sudėties žvaigždės – juda taip, kaip spiralinių galaktikų II populiacijos objektai. Būtent apie savosios galaktikos centrą jos skrieja labai ištęstomis orbitomis ir netvarkingai, mažai teprisilaikydamos vienos pagrindinės plokštumos. Taip juda ir kamuoliniai spiečiai, kurių gausu stambiose E galaktikose. Taigi suminis visos E galaktikos judesio kiekio momentas visai mažas, daug mažesnis už tokios pat masės spiralinės galaktikos judesio kiekio momentą. Galima sakyti, kad E galaktika, kaip visuma, beveik nesisuka apie ašį arba sukasi labai lėtai.

Dar vienas principinis elipsinių galaktikų skirtumas nuo spiralinių yra daug didesnis jų žvaigždinis tankis. E galaktikos esti kelis kartus mažesnio skersmens negu tos pačios masės S arba SB galaktikos. Savo tūriu ir struktūra visa E galaktika maždaug atitinka tos pačios masės S galaktikos centrinį telkinį.

Vidutines, o ypač masyviąsias elipsines galaktikas, supa Rentgeno spindulius skleidžiančios aureolės, vadinamieji ***rentgeniniai vainikai***. Tai labai mažo tankio ir milijonų ar dešimčių milijonų laipsnių karščio jonizuotos dujos. Viename m^3 tėra vos tūkstančiai ar dešimtys tūkstančių dujų dalelių. Ištisinio spektro Rentgeno fotonus sukuria karštos plazmos greiti elektronai atsitrenkdami į protonus, helio branduolius ir negausius sunkesnių atomų branduolius ar teigiamus jonus. Nemaža dalis elektronų kinetinės energijos, juos stabdant, virsta atsirandančių fotonų energija. Tai vadinamasis ***stabdomasis spinduliavimas.*** Rentgeninių vainikų spektras ne tik ištisinis. Jame yra ir emisijos linijų, kurias sukuria daug kartų jonizuoti Fe, Si, S, O, N, Mg atomai. Šių Rentgeno diapozono emisijos linijų analizė rodo, kad rentgeninių vainikų dujų cheminė sudėtis artima Saulės cheminei sudėčiai.

Jeigu galaktikų gravitacinį lauką sukurtų vien tik žvaigždės, karštos rentgeninių vainikų dujos jau būtų seniai išsisklaidžiusios. Sulaikyti nuo išsisklaidymo gali tik daug stipresnis gravitacinis laukas. Karštųjų dujų masė aiškiai per maža tokiam laukui sukurti. Šitokiais samprotavimais remiantis, buvo pasiūlyta hipotezė apie nematomąją medžiagą, kuri turėtų būti pasklidusi ir žvaigždžių

užpildytame galaktikos tūryje, ir tarp rentgeninio vainiko jonizuotų dujų, ir galbūt nusitęsusi dar toliau sudarydama vadinamuosius ***tamsiuosius*** galaktikų ***vainikus***. Rentgeniniai vainikai rasti ir aplink kai kurias spiralines galaktikas, tarp jų ir aplink mūsų Galaktiką.

8.1.3. Netaisyklingosios galaktikos

Šios galaktikos žymimos ***Ir*** (*irregular*). Tai vidutinės, o dažniausiai mažos masės, labai įvairios padrikos struktūros, neretai nesimetriški žvaigždžių debesys. Žvaigždžių koncentracija centro link nedidelė. Centrinis telkinys neryškus arba jo visiškai nėra. Skirtingų Ir galaktikų regimojo paviršiaus vienetinio kampinio ploto spindesys, taigi ir skaistis labai nevienodas. Vienos Ir galaktikos puikuojasi gana dideliu skaisčiu, kitos vidutinės, dar kitos – visiškai blankios, daug blankesnės už naktinio dangaus foną, ir todėl gali būti priskirtos LSB galaktikoms (žr. **8.1.1.1** skirsnelį). Taip pat nevienodas (dažniausiai netvarkingai) ir tos pačios galaktikos skirtingų vietų skaistis. Neretai šiaip gana blausi galaktika atrodo tarytum būtų padrikai apibarstyta atskiromis skaisčiau švytinčiomis dėmėmis.

O šios dėmės – tai pagreitėjusios žvaigždėdaros židiniai. Mat Ir galaktikose dar tebėra daug tarpžvaigždinės medžiagos – neretai dujų masė nedaug mažesnė nei visų galaktikos žvaigždžių masė, o kartais net didesnė už ją. Iš šių dujų (su labai nedidele dulkelių priemaiša) tebesiformuoja daug naujų žvaigždžių. Dažniausiai tai vyksta grupėmis, iš kurių stambiausios tampa jaunais kamuoliniais spiečiais. Taip pat randama ir labai senų bei vidutinio amžiaus kamuolinių spiečių. (Prisiminkime, kad spiralinėse galaktikose beveik visi kamuoliniai spiečiai yra labai seni, elipsinėse – vieni labai seni, kiti vidutiniai.)

Tarpžvaigždinių dujų cheminė sudėtis skirtingose Ir galaktikose gana skirtinga. Tačiau visur už helį sunkesnių elementų tebėra kelis ar keliasdešimt kartų mažiau nei Saulėje. Dėl šio stygiaus Ir galaktikų tarpžvaigždinėje medžiagoje dulkelių procentas yra mažesnis negu S galaktikų tarpžvaigždinėje medžiagoje. Taigi Ir galaktikose dabar susidaro tokios žvaigždės, kurios savo chemine sudėtimi užima tarpinę padėtį tarp vadinamųjų nemetalingųjų ir normalios cheminės sudėties žvaigždžių. Spiralinėse galaktikose tokių tarpinės cheminės sudėties žvaigždžių yra nedaug. Seniausios Ir galaktikų žvaigždės savo chemine sudėtimi niekuo nesiskiria nuo kitų klasių galaktikų seniausiųjų žvaigždžių – jose visose už helį sunkesnių elementų yra apie 100 kartų mažiau negu Saulėje.

Matome, kad Ir galaktikos savo chemine evoliucija (žr. **5.24** poskyrį) daugiau ar mažiau atsiliko nuo S ir masyviųjų E galaktikų. Mat Ir galaktikos formavosi (praktiškai dar tebesiformuoja) iš mažesnio tankio dujų telkinių – proga-



8.14 pav. *Dvi netaisyklingosios galaktikos – Paukščių Tako galaktikos palydovės. Tai Didysis Magelano Debesis (kairioji) ir Mažasis Magelano Debesis (dešinioji). Matome, kad DMD nėra visiškai netaisyklinga galaktika, nes centrinė, skaisčiau švytinti jos dalis sudaro skersę, nuo kurios galų prasideda spiralinių vijų užuomazgos. Kairiosios spiralinės vijos užuomazgos didžioji ir skaisčiausiai švytinti dalis – tai gigantiškas emisinis ūkas (per 300 pc skersmens jonizuotas superdebesis) Tarantulas, arba Aukso Žuvies 30, arba NGC 2070, ir su juo susijusi žvaigždžių superasociacija (dar žr.* ***6.5, 27s*** *ir* ***37s*** *pav.)*

laktinių debesų. Dėl to žvaigždėdara jose buvo lėtesnė ir tebesitęsia mūsų dienomis, žvaigždinis tankis tebėra mažesnis negu vidutiniškai S ir E galaktikose (žinoma, išskyrus LSB galaktikas). Tuo būdu žvaigždės Ir galaktikose dar nespėjo už helį sunkesnių elementų savo gelmėse prigaminti ir jais praturtinti tarpžvaigždinę medžiagą tokiu mastu, kokiu tai padaryta S galaktikų diskuose.

Tačiau žvaigždėdara Ir galaktikose lėta tik sąlygiškai. Ten, kur susidaro įvairaus dydžio lokaliniai difuzinės medžiagos sutankėjimai, prasideda intensyvi žvaigždėdara, greitai susiformuoja daug naujų žvaigždžių. Tarp jų pasitaiko ir labai masyvių, įkaistančių iki ankstyvųjų B ir O spektrinių klasių. Savo spinduliavimo galia mūsų Saulę jos pralenkia dešimtis ir šimtus tūkstančių ar net milijonus kartų. Skleidžiamos energijos liūto dalis tenka ultravioletiniams spinduliams. Regimojoje šviesoje vyrauja violetiniai ir mėlynieji spinduliai, tokiems pagreitintos žvaigždėdaros židiniams suteikdami baltą spalvą su šiek tiek melsvu atspalviu. Masyviausios naujagimės ne tik pačios labai galingai šviečia, nustelbdamos mažos masės žvaigždes (tiek senas, tiek ir

naujagimes), bet ir jonizuoja aplinkinį vandenilį, o dažnai ir helį, tuo būdu sukurdamos didžiules švytinčias H II zonas su emisijos linijomis.

Taigi pagreitintos žvaigždėdaros sritys, kur yra ir masyviausiųjų naujagimių žvaigždžių, šviečia daug stipriau už aplinkinius tūrius ir tuo būdu sudaro jau minėtas skaistesnes dėmes blausesniame visos galaktikos fone. Intensyvi žvaigždėdara tokiame atskirame židinyje trunka keliolika ar keliasdešimt milijonų metų. Per tą laiką sumažėja difuzinės medžiagos tankis, nes dalis šios medžiagos susitraukia į gimstančias žvaigždes, o kita dalis yra išsklaidoma masyviųjų naujagimių ir šiek tiek vėliau atsirandančių supernovų. Taip vienos skaisčios dėmės blėsta, o kitose vietose tai šen, tai ten įsižiebia kitos.

Kai kuriose Ir galaktikose, ypač stambesnėse, galima užčiuopti kažką panašaus į labai menkas spiralinių vijų arba skersės ir spiralinių vijų užuomazgas. Tokia, pavyzdžiui, yra ir stambiausioji mūsų Galaktikos palydovė – Didžiojo Magelano Debesies (DMD) netaisyklingoji galaktika. Kai kuriuos giminystės ryšius su spiralinėmis galaktikomis bandoma įžvelgti ir kitoje Ir klasės mūsų palydovėje – MMD galaktikoje. Galbūt tam tikra Ir galaktikų dalis – tai nevykėlės S arba SB galaktikos, kurioms tapti normaliomis S arba SB galaktikomis visų pirma sutrukdė masės mažumas, taip pat gal ir kitos priežastys, pavyzdžiui, galaktikų suartėjimai ar susidūrimai.

8.1.3.1. Melsvosios kompaktiškosios nykštukinės galaktikos (žymimos simboliu *dBC*)

Jei dIr nykštukinė galaktika yra gana maža, tai keli vienu metu veikiantys pakankamai stambūs ir intensyvūs žvaigždėdaros židiniai gali apimti didžiąją tokios galaktikos tūrio dalį ir dešimtis ar šimtus kartų padidinti jos buvusią silpną spinduliavimo galią. Žvelgiant iš didesnio nuotolio, tokie galingi židiniai projekcijoje į dangaus sferą praktiškai susilieja į vieną skaisčią dėmę (dažniausiai su stipriomis emisijos linijomis), o blausūs galaktikos pakraščiai gali likti nepastebėti. Dėl to tokios galaktikos atrodo visiškai mažo skersmens, bet labai didelio skaisčio, taigi ypač kompaktiškos. Jos savo išvaizda mažai tesiskiria nuo mūsų Galaktikos žvaigždžių. Jų skleidžiamos energijos sudėtyje palyginti su kitomis galaktikomis yra daug didesnis trumpabangių (mėlynųjų, violetinių, o ypač ultravioletinių) spindulių procentas (dėl masyviųjų naujagimių žvaigždžių). Tokias mažytes galaktikas daugelis autorių iš netaisyklingų galaktikų klasės išskiria į atskirą ***melsvųjų kompaktiškųjų nykštukinių galaktikų*** poklasį, žymimą ***dBC*** (angl. *blue compact galaxies*). Dėl jų mažo skersmens nykštukų simbolis d prirašomas ir tais neretais atvejais, kuomet dėl didelio skaisčio jų absoliutinis ryškis $M_V < -16$. Šios galaktikos kartais dar vadinamos **nykštukinėmis Cvikio galaktikomis.** Mat JAV astronomas Fricas Cvikis (*Fritz Zwicky*) atkreipė į jas dėmesį, jų daug atrado, tyrinėjo, įtraukė į savo sudarytą įvairių didelio skaisčio galaktikų katalogą.

Pasitaiko ir tokių dBC galaktikų, kuriose emisiniams ūkams (H II zonoms) būdingos emisijos linijos tokios stiprios, kad visiškai nustelbia žvaigždžių šviesą, užmaskuoja jų sugerties linijas. Atrodo, tarytum mes stebime ne galaktikas, o kažkokius masyvius tarpgalaktinius jonizuoto vandenilio ir helio debesis. Tačiau ten turi būti ir žvaigždžių. Juk vandenilį ir helį jonizuoja naujagimės masyviosios B2–O spektrinių klasių žvaigždės, kurios, atidžiau patyrinėjus, neretai ir aptinkamos, nors ir gerokai užmaskuotos galingų H II zonų švytėjimo. Vadinasi, ten vyksta ypač greita žvaigždėdara. H I atomų skleidžiamos 21 cm ilgio radijo bangos rodo, kad nejonizuoto vandenilio ten yra dar daug daugiau negu jonizuoto. Tuo būdu visų dujų masė ten gal net kelis kartus tebėra didesnė už visų žvaigždžių masę. Dar negalima vienareikšmiškai pasakyti, kodėl tokių mažos masės galaktikų formavimasis taip ilgai užsitęsė, kodėl žvaigždėdara, kadaise buvusi labai lėta, vėlesniaisiais laikotarpiais labai pagreitėjo.

8.2. PEKULIARIOSIOS GALAKTIKOS

Galaktikų pasaulis toks įvairus, kad Hablo schema jį apibūdina tik labai apytiksliai ir neišsamiai. Taip pat yra nemažai galaktikų, kurioms Hablo schema arba beveik visiškai netinka, arba nusako ne visus jų bruožus. Tokios galaktikos dažnai vadinamos ***pekuliariosiomis galaktikomis*** (lot. *peculiaris* – ypatingas, nepaprastas, išskirtinis). Apibūdinimą pekuliarioji neretai pridedame ir neatsisakydami Hablo klasifikacijos. Pavyzdžiui, pekuliarioji spiralinė galaktika – tai tokia galaktika, kurią bent apytiksliai galima priskirti S klasei, tačiau kuri turi ir tam tikrų svarbių savitumų. Dažniausiai pekuliarumą sukelia galaktikų susidūrimai ar bent suartėjimai su kitomis galaktikomis ir tarpgalaktiniais dujų debesimis.

8.2.1 skirsnelyje aptarsime galaktikas, kurių struktūrai turėjo įtakos tokie susidūrimai ar suartėjimai, įvykę praeityje.

8.2.2 skirsnelyje kalbėsime apie vadinamąsias ***sąveikaujančias galaktikas***, kurios matomos paties suartėjimo metu.

Prie pekuliariųjų galaktikų galima priskirti ir gausias bei įvairias ***aktyviąsias galaktikas***. Apie jas rašysime **8.4** poskyryje.

8.2.1. Susidūrimų ar suartėjimų poveikis galaktikoms

Galaktikų formavimąsi ir visą tolesnę jų raidą lėmė ne tik tokie progalaktikės vidiniai faktoriai, kaip matomosios ir nematomosios medžiagos masė, tankis, jo didėjimo centro link mastas, judesio kiekio momentas, turbulentiniai judesiai,

bet ir atskirų progalaktikių, o vėliau jau ir galaktikų glaudūs suartėjimai ar net susidūrimai, kurie ypač tikėtini galaktikų spiečiuose.

Šitokių suartėjimų ir susidūrimų padarinius mėginama modeliuoti galingais kompiuteriais, skaičiavimų rezultatus, kur tik galima, lyginant su stebėjimų duomenimis. Labai įdomius stebėjimo duomenis pateikė Hablo kosminis teleskopas, atskirais atvejais leidęs net galaktikų centrinėse srityse išskirti kelių dešimčių ar vos kelių šviesmečių dydžio detales. Su šiuo teleskopu savo galimybėmis pradėjo varžytis ir didžiausieji bei moderniausieji antžeminiai teleskopai. Tačiau efektingų stebėjimų rezultatų dar mažoka. Paskutiniuoju metu labai išaugęs astronomų dėmesys šiems darbams ir būsimieji dar įspūdingesni kosminiai bei antžeminiai teleskopai leidžia tikėtis, kad po dešimties metų mūsų žinios apie galaktikų suartėjimų ir susidūrimų įtaką jų raidai (kaip ir apie pačią kilmę bei raidą) pagerės iš esmės. Todėl dabar pasitenkinsime tik trumpu pačių bendriausių šių darbų rezultatų paminėjimu.

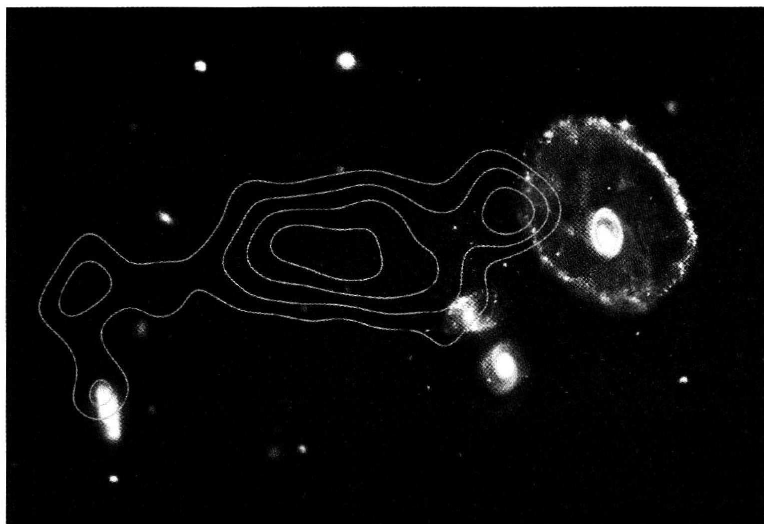
Susidurdamos galaktikos arba susilieja, arba iškrinka ir suskyla, nuo jų gali atitrūkti įvairios atplaišos tapdamos savarankiškomis netaisyklingosiomis galaktikėlėmis. Tam tikrais atvejais susidūrusios galaktikos gali net pereiti viena per kitą ir visiškai neiškrikti, o tik labai pasikeisti. Susidūrimo rezultatai priklauso nuo to, kokios galaktikos susiduria ir kaip jos susiduria. Svarbu, koks susidūrimo greitis, kokiais kampais susitinka pagrindinės plokštumos, kokiu tikslumu vienas į kitą taiko galaktikų centrai, kiek yra galaktikas gaubiančios nematomosios medžiagos, kaip ji pasiskirsčiusi. Vienaip esti, kai susidūrimas centrinis, ir visai kitaip, kai galaktikos susiduria tik savo pakraščiais. Panašu, kad vyrauja galaktikų susiliejimo, jų stambėjimo tendencija.

Jei susilieja dvi labai nevienodos masės galaktikos, tai galima sakyti, kad mažesnioji galaktika tiesiog įkrinta į didžiąją ir yra jos užgrobiama. Didesniosios galaktikos struktūra nelabai pasikeičia. Pagrobusi mažą galaktikėlę, elipsinė galaktika ir toliau lieka elipsine (tiesa, jau kitokios struktūros), spiralinė – spiraline.

Panašu, kad į mūsų Galaktiką prieš kelis milijardus metų įkrito nedidelė turbūt elipsinė galaktikėlė, kurios kompaktiška centrinė dalis išsilaikė nesuirusi ir dabar atrodo kaip didelis apie 100 pc skersmens kamuolinis spiečius, turintis per milijoną žvaigždžių. Tai pietiniame danguje plika akimi gerai matomas kamuolinis spiečius Kentauro ω, arba NGC 5139. Nuo Žemės iki jo 5200 pc. Jo žvaigždės yra labai nevienodo amžiaus ir cheminės sudėties, o tai nebūdinga tikriems kamuoliniams spiečiams.

Jei susilieja dvi maždaug vienodos masės galaktikos, tai po ilgo ir sudėtingo struktūros kitimo, užtrunkančio šimtus milijonų ar milijardus metų, galų gale dažniausiai turėtų susiformuoti dvigubai sustambėjusi elipsinė galaktika ne tik tais atvejais, kai susilieja dvi elipsinės galaktikos, bet ir susiliejus elipsinei galaktikai su spiraline ir net dviem spiralinėms galaktikoms.

Kaip rodo apskaičiuoti modeliai, turėtų būti matoma nemažai įvairių sa-



8.15 pav. *Hablo kosminiu teleskopu gautas galaktikų grupelės Skulptoriaus žvaigždyne vaizdas. Grupelės nuotolis – 150 milijonų pc. Baltos vingiuotos linijos – tai radijo izofotos, rodančios radijo bangas skleidžiantį plazmos šleifą, atsiradusį sąveikaujant galaktikoms. Kitas galaktikų poveikio viena kitai įrodymas – didesniosios galaktikos, pavadintos Karietos Ratu, žiediška forma. Spiralinė galaktika virsta žiediškąja, kada tiesiai per ją neria kita daug mažesnė, bet labai kompaktiška galaktika, sukeldama ratu į šonus plintančią smūginę bangą, kuri sujaukia spiralinę struktūrą ir pakeliui labai suspaudžia tarpžvaigždinę medžiagą, ten sukeldama greitėjančią žvaigždėdarą. Tuo būdu paskui smūginę bangą seka labai ryškus pėdsakas – žvaigždėdaros lizdais žėrintis ratas. Jame labiausiai šviečia pačios masyviausios naujagimės – O ir B spektrinių klasių žvaigždės – ir jų ultravioletinių spindulių sukurti emisiniai ūkai*

votiškos išvaizdos ir sudėtingos vidaus sandaros galaktikų, kurios jau susiliejusios, bet galutinė struktūra jose dar nenusistovėjusi. Spiralinių ar elipsinių galaktikų bruožai jose turėtų būti daugiau ar mažiau iškraipyti įvairių pekuliariškumų. Tai jau pradedama patvirtinti ir kai kuriais stebėjimų rezultatais. Jau rasta nemaža tokių galaktikų, kurių struktūrą bent kol kas tegalima paaiškinti dviejų galaktikų susiliejimu. Tai ir dujų bei dulkelių klodai kai kurių šiaip tarytum elipsinių galaktikų centrinėse srityse, ir specifinis skaisčio pasiskirstymas kai kurių elipsinių galaktikų regimuosiuose paviršiuose, ir skirtingais kampais orientuotų diskų dalys, ir į priešingas puses besisukančios gretimos sritys.

Galbūt kai kurie galaktikų susiliejimo variantai lemia galaktikų su aktyviais branduoliais atsiradimą.

Galaktikoms labai suartėjus, potvynių jėgos dalį dujų, dulkių ir žvaigždžių gali ištempti į tarpgalaktinę erdvę. Galaktikoms susiduriant, jose esantys dujų ir dulkių klodai irgi susiduria.Tuomet per juos nusirita galingos smūginės bangos. Vienais atvejais jos pajėgia nugalėti susidurianči galaktikų

gravitacinį lauką ir į tarpgalaktinę erdvę išmesti nemažą dalį tarpžvaigždinės medžiagos. Kitais atvejais gravitacinis laukas lieka neįveiktas. Tačiau smūginių bangų suspaustoje tarpžvaigždinėje medžiagoje labai pagreitėja žvaigždėdara, kuri laikinai sukelia dar ir audringumo reiškinius. Visa tai taip pat gali greitai išnaikinti tarpžvaigždinę medžiagą.

Kai kurios glaudžiai suartėjusios galaktikos gali turėti viena kitos atžvilgiu per didelį judesio kiekio momentą, kuris neleidžia joms iš karto susilieti. Tuomet jos prasilenkia pro šalį ir vėl išsiskiria, tiesa, prarasdamos dalį savo žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos. Tačiau tarpusavio trauka neretai neleidžia joms išsiskirti galutinai. Jos vėl dar glaudžiau suartėja. Ir vėl gali net keletą kartų laikinai išsiskirti. Tokios galaktikos, palaipsniui prarasdamos dalį savo judesio kiekio momento, pasmerktos galų gale susilieti.

Tačiau gali susidaryti ir toks gravitacijos ir išcentrinių inercijos jėgų tarpusavio išsidėstymas, kad menkesnė ir mažiau kompaktiška galaktika sudraskoma, o jos žvaigždės, dujos ir dulkės ar bent jų dalis neįkrenta į stambesniąją ir kompaktiškesniąją, mažiau nukentėjusią galaktiką, o ima įvairiai orien-



8.16 pav. *„Žieduota" galaktika NGC 4650A Kentauro žvaigždyne už 40 Mpc nuo mūsų. Nuotrauka gauta Hablo kosminiu teleskopu. Aplink nedidelę lęšinę galaktiką, sudarytą iš senų žvaigždžių, beveik statmenai jos pagrindinei plokštumai 100 km/s greičiu sukasi 18 kpc skersmens žiedas, kuriame vyksta greita žvaigždėdara. Kompiuteriniai modeliai rodo, kad tokie žiedai galėtų susidaryti potvynių jėgoms iš neatsargiai priartėjusios mažiau kompaktiškos galaktikos išplėšus dujų, dulkelių ir žvaigždžių srautą arba tą „nelaimėlę" kaimynę visiškai suardžius. Pagrobtoji medžiaga išsilaiko neįkritusi į pagrobėjos vidų tuo atveju, jei jos atžvilgiu turi didelį judesio kiekio momentą. Šitokią struktūrą nuo iškrikimo turėtų saugoti ją storai apgaubusi didelės masės nematomoji medžiaga*

tuoto žiedo pavidalu apie ją skrieti. Tokio žiedo struktūra ir išvaizda, jo susiformavimo ir stabilumo aplinkybės daug priklauso nuo suartėjusias galaktikas gaubiančios nematomosios medžiagos prigimties, kiekio ir pasiskirstymo. Formuojantis tokiam žiedui, dujų tankis gali pasidaryti pakankamai didelis, kad ten prasidėtų greita žvaigždėdara.

Galaktikų su žiedais, kurie galbūt susidarė pagal čia aprašytąjį scenarijų, aptikta netoli šimto. Viena jų parodyta **8.16** pav.

Šaulio žvaigždyne maždaug anapus mūsų Galaktikos centro slepiasi visiškai prie mūsiškės priartėjusi mažytė galaktikėlė, jau ištempta į ilgą lanką, beveik statmeną Paukščių Tako plokštumai. Panašu, kad šitaip formuojasi žiedas ir apie mūsų Galaktiką.

8.2.2. Sąveikaujančios galaktikos

Tai glaudžios dvinarės ar daugianarės galaktikos su įvairiausiais deformacijos požymiais (jų pavyzdžiai yra **8.17–8.22** pav.). Pavyzdžiui, iš abiejų arba vienos galaktikos išsikiša šviečiantys iškyšuliai, ilgos ir tiesios arba išriestos uodegos, neretai nukreiptos į priešingas puses; dvi galaktikas jungia įvairios formos tiltai, ploni lieptai ar deformuotos spiralinės vijos; su deformuotomis galaktikomis ir jų glaudžiais palydovais susiję šviečiantys lygūs arba mazguoti žiedai; keli skaisčiau švytintys mazgai, susibūrę į glaudų lizdą arba išsilenkę grandine, gali būti sujungti bendra blankiau švytinčia aureole ir t. t. Daugiau kaip pusės sąveikaujančių spiralinių galaktikų diskai yra išlinkę.

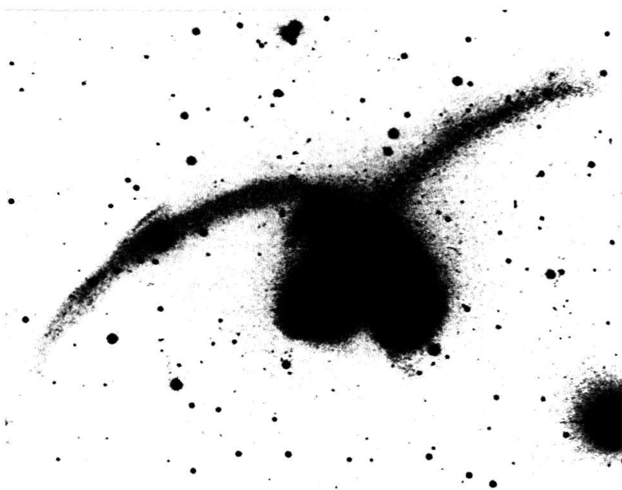
Galingų kompiuterių apskaičiuoti modeliai rodo, kad svarbiausia šių reiškinių priežastis yra labai suartėjusių galaktikų **gravitacinė sąveika**, taigi **potvynių jėgos**. Joms gali talkininkauti ir **magnetinės jėgos**. Visų šių jėgų vaidmuo ne tik tiesioginis. Svarbiausia, kad šios jėgos, smūginių bangų padedamos, atskiruose ruožuose gerokai padidina tarpžvaigždinės medžiagos tankį ir tuo būdu labai **pagreitina žvaigždėdaros procesą.** Ten atsiranda daug jaunų O ir B spektrinių klasių žvaigždžių, kurios ne tik pačios labai galingai spinduliuoja, ypač mėlynuosius, violetinius ir UV spindulius, bet ir jonizuoja vandenilio bei helio dujas, sukelia stiprų H II sričių švytėjimą. Tokie skaisčiau švytintys pluoštai gali atrodyti lyg ilgos pavienės atšakos net ir tada, kai iš tikrųjų beveik nėra išsikišę į tarpgalaktinę erdvę. Mes tiesiog neįžiūrime juos supančių senų žvaigždžių sukelto silpno švytėjimo. Kartais sąveikaujančių galaktikų lizdo ar grandinės iliuziją gali sukelti net ir vieniša didesnė galaktika, kurioje atsirado (gal dėl praeityje labai arti pralėkusios kitos galaktikos sukeltų potvynių) kelios atskiros labai padidėjusio dujų tankio, taigi pagreitėjusio žvaigždžių gimimo sritys. Šie žvaigždžių lopšiai daug skaisčiau šviečia už aplinkines vietas ir atrodo kaip atskiros labai arti viena kitos



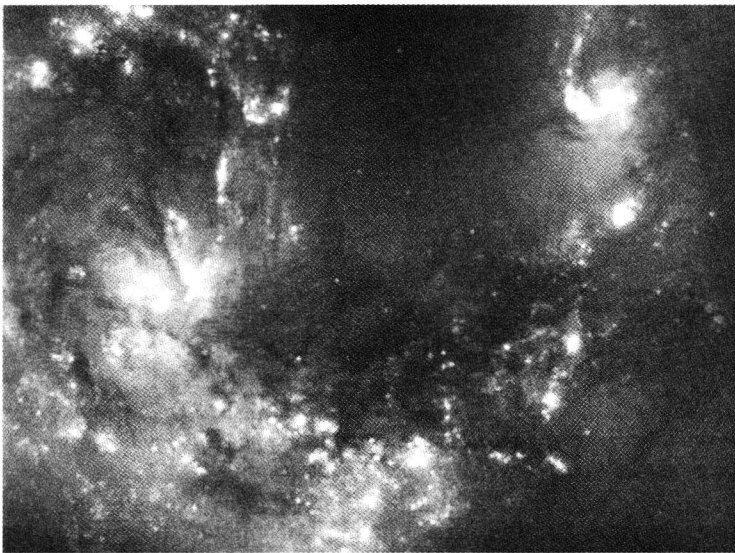




8.17 pav. *Spiralinė galaktika (Sbc) Verpetas, arba M 51, arba NGC 5194, Skalikų žvaigždyne. Iki jos 8–9 Mpc. Dangaus perspektyvoje atrodo, kad jos spiralinės vijos tęsinyje yra kita, daug mažesnė SB0 pec tipo galaktika NGC 5195. Iš tikrųjų NGC 5195 yra 100 kpc toliau negu M 51. Tai sąveikaujančių galaktikų pora. Jų nuotraukos apačioje schematiškai pavaizduotas jų glaudaus prasilenkimo kompiuterinis modelis. Pirmasis iš kairės piešinys vaizduoja padėtį maždaug prieš 150 milijonų metų, ketvirtasis – dabartinę padėtį. Mažesnioji galaktika didesniosios atžvilgiu juda 100 km/s greičiu. Labiausiai suartėjusios buvo prieš 10^8 metų. Matome, kad galaktikų susiglaudimas mažesniąją iš spiralinės skersinės pavertė lęšine skersine, o didesniosios spiralinė struktūra išliko, nors ir deformavosi*



8.18 pav. *Dvi sąveikaujančios galaktikos „Antenos", arba VV 21, arba NGC 4038 ir 4039, Varno žvaigždyne (negatyvinis vaizdas). Dešinėje, prie pat paveikslo krašto – žvaigždė*

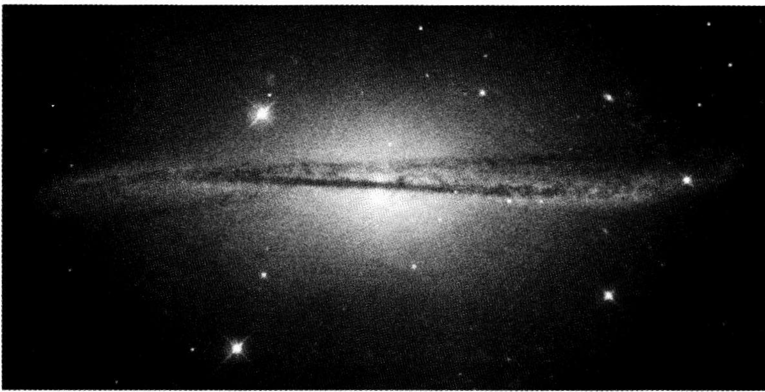


8.19 pav. *Hablo kosminiu teleskopu gautas susidūriančių „Antenų" galaktikų (žr.* ***8.18*** *pav.) centrinės dalies vaizdas. Susidūrimo sukeltos smūginės bangos labai sutankino dalį tarpžvaigždinės medžiagos, iš kurios susidarė per tūkstantį naujų kamuolinių spiečių, kurių amžius – mažiau nei 10^7 metų*

esančios mažos melsvos galaktikos, apgaubtos bendros, blausiau švytinčios aureolės. Prisiminkime, kad spiralines vijas sukuria besisukančiame diske plintančios tankio bangos. Potvynių jėgos gali šias bangas visaip deformuoti ir tuo būdu prisidėti prie naujų detalių atsiradimo. Galaktikų suartėjimai gali



8.20 pav. *Dvi pavojingai suartėjusios spiralinės galaktikos NGC 2207 (didesnioji) ir IC 2163 (mažesnioji) Didžiojo šuns žvaigždyne už 35 Mpc nuo mūsų. CCD nuotrauka gauta Hablo kosminiu teleskopu. Matome, kaip nuo mažesniosios galaktikos, jai artėjant prie didesniosios, atsiliko žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos šleifas. Galbūt IC 2163 dar keletą milijardų metų ištęsta orbita judės apie NGC 2207, kol pagaliau galutinai su ja susilies*



8.21 pav. *Pekuliari spiralinė galaktika ESO 510-G13 Hidros žvaigždyne už 50 mln. pc nuo mūsų. Galaktikos struktūrą sujaukė, diską išlankstė, žvaigždėdarą pagreitino praeityje įvykęs suartėjimas su kita galaktika. Hablo kosminio teleskopo nuotrauka*

paveikti skersių susidarymą, t. y. didinti SB galaktikų skaičių. Todėl galaktikų spiečių centrinėse srityse, kur galaktikos arčiau viena kitos, SB galaktikų daugiau negu pakraščiuose. Dėl difuzinės medžiagos kritimo į galaktikas iš tarpgalaktinės erdvės (**akrecija**), jei jį ima reguliouti potvynių bei magnetinės jėgos, irgi gali atsirasti įvairios sąveikaujančių galaktikų formos. Jei viena iš glaudžios galaktikų poros turi aktyvų branduolį, iš kurio veržiasi dujų čiurkšlės, kaimyninės galaktikos trauka, o iš dalies ir magnetinės jėgos toms čiurkšlėms gali suteikti neįprastų formų. Kai kurie sąveikaujančių galaktikų lizdai galbūt yra praeityje susidūrusių dviejų galaktikų iškritę likučiai.

Galaktikų spiečiuose esančių galaktikų dujas kartais gali suspausti ir tuo būdu žvaigždėdarą pagreitinti smūginės bangos, kurios galbūt susidaro galaktikoms dideliu greičiu judant pro tarpgalaktines dujas ir susiduriant su stambiais tarpgalaktiniais debesimis. Maži tarpgalaktiniai dujų debesys gali tiesiog įsiveržti į galaktikos vidų ir čia vietomis sukelti smūgines bangas.

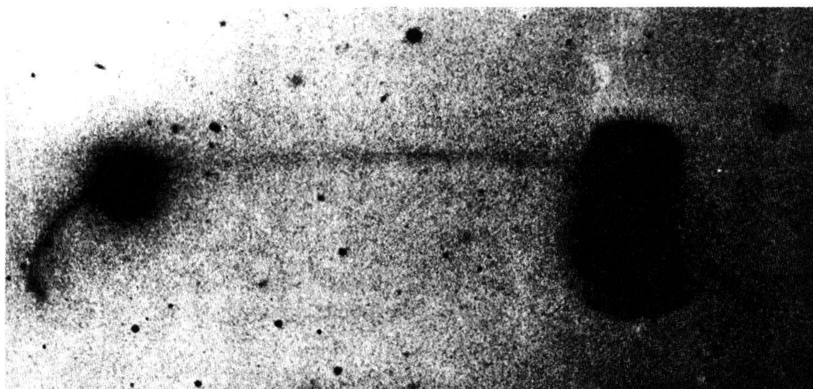
8.3. GALAKTIKŲ NUOTOLIAI

Pagrindinė formulė, astronomijoje naudojama nuotoliams r nustatyti, yra regimojo ir absoliutinio ryškių sąryšio formulė:

$$\lg r = \frac{V - M_V + 5 - A_V}{5}. \qquad (8.1)$$

Čia V yra išmatuotas žvaigždės (mūsų atveju esančios svetimoje galaktikoje) arba visos galaktikos regimasis ryškis, A_V – ryškio prieaugis dėl tarpžvaigždinės ekstinkcijos (šviesos susilpnėjimo ir svetimoje, ir mūsų Galaktikoje), M_V – žvaigždės arba visos galaktikos absoliutinis ryškis.

Didžiaisiais teleskopais gautuose artimiausiųjų galaktikų vaizduose mato-



8.22 pav. *Dvi sąveikaujančios galaktikos NGC 5216 (kairėje) ir NGC 5218 (negatyvinis vaizdas)*

ma gausybė atskirų žvaigždžių. Susilieja tik pačios centrinės galaktikų dalys. Tarp atskirai matomų žvaigždžių randama daugybė įvairių tipų pulsuojančių kintamųjų: cefeidžių, miridžių, virginidžių, lyridžių ir kitokių. Nustačius jų ryškio kitimo periodus ir ištyrus kitas charakteristikas, iš analogijos su tokio pat tipo mūsų Galaktikos žvaigždėmis joms galima priskirti absoliutinius ryškius ir, pasinaudojus (**8.1**) formule, apskaičiuoti jų nuotolius. Tuo pačiu nustatome ir visos tiriamosios galaktikos nuotolį.

Tolimesnėse galaktikose pulsuojančios kintamosios žvaigždės darosi per silpnos ir neišskiriamos. Jose dar gali būti stebimos pačios šviesiausios supermilžinės ir novos. Joms irgi galima priskirti absoliutinius ryškius, tiesa, mažesniu tikslumu.

Dar tolimesnių galaktikų atstumus nustatome priskirdami absoliutinius ryškius atskirai įžiūrimoms H II zonoms, žvaigždžių spiečiams bei debesims ir kitoms galaktikų detalėms. Ypač iš toli yra matomos supernovos. Tikimasi, kad sėkmingiausiai absoliutiniai ryškiai priskiriami Ia tipo supernovoms.

Jei galaktika yra pakankamai toli, tai matuojamas tik visos galaktikos regimasis ryškis. Įvairių tipų galaktikų absoliutiniai ryškiai, reikalingi (**8.1**) formulėje, nustatomi pagal artimas mums galaktikas, kuriose matosi atskiros žvaigždės.

Priskiriant galaktikoms absoliutinius ryškius, galima labai apsirikti, nes galaktikos yra labai nevienodo šviesio (žr. **15** lentelę). Siekiant išvengti klaidų, į pagalbą pasitelkiami galaktikų spiečiai. Pastebėta, kad panašaus tipo spiečiuose šviesiausios galaktikos yra panašios spinduliavimo galios. Pavyko sukurti neblogus metodus, kaip priskirti vidutinius absoliutinius ryškius tam tikram skaičiui šviesiausių kokio nors labai tolimo spiečiaus galaktikų ir taip apskaičiuoti to spiečiaus apytikslį nuotolį. O tada jau galima nustatyti ir lyginti tarpusavyje bei su kitomis galaktikomis daugybės tame spiečiuje esančių galaktikų charakteristikas.

Nustatant galaktikų nuotolius, bandoma pasinaudoti ir vadinamuoju skersmenų metodu – tam tikrų rūšių gerai pažįstamoms galaktikoms arba atskiroms jų detalėms, kurių kampiniai skersmenys d išmatuojami kampinėmis sekundėmis, priskiriami linijiniai skersmenys D. Padarius prielaidą, kad stebėjimams prieinamuose nuotoliuose galioja Euklido geometrija, tokios galaktikos nuotolis apskaičiuojamas pagal paprastą trikampio formulę:

$$r = \frac{206265''}{d''} D. \qquad (8.2)$$

Šis metodas irgi neapsaugo nuo didelių apsirikimų.

8.3.1. S. Faber ir R. Džeksono bei R. Tulio ir Dž. Fišerio metodai galaktikų masėms, šviesiams ir nuotoliams nustatyti

Maždaug prieš 30–40 metų padaryta didelė pažanga nustatant vidutinio nuotolio ir tolimų E bei S galaktikų atstumus, kai buvo surinkta ir išanalizuota daugybė duomenų apie galaktikų spektrus, masę, skersmenis ir šviesius. Palaipsniui išryškėjo sąryšiai (kiekvienai galaktikos klasei ir poklasiui atskirai) tarp Doplerio reiškinio sukelto spektro linijų išplitimo arba pasislinkimo ir galaktikos masės, o savo ruožtu – tarp masės ir šviesio. Tai aptarsime atskirai elipsinėms ir atskirai spiralinėms galaktikoms.

Galaktikos spektras – tai visų jos žvaigždžių ir ūkų spektrų suma. Paprastos elipsinės galaktikos beveik neturi tarpžvaigždinės medžiagos. Todėl jų spektre vyrauja raudonųjų milžinių šviesus ištisinis fonas ir jų sugerties linijos. Spiralinių galaktikų spektruose, be žvaigždžių sukurtų sugerties linijų, dažniausiai matomos ir ūkų emisijos linijos.

Elipsinėse galaktikose žvaigždės apie galaktikos centrą juda labai ištęstomis orbitomis, kurios nesilaiko ar beveik nesilaiko vienos pagrindinės plokštumos. Todėl visada yra tam tikra dalis žvaigždžių, artėjančių į Žemę (jei atimsime galaktikos centro judėjimą Žemės atžvilgiu), ir dalis – tolstančių nuo Žemės. Pirmųjų žvaigždžių spektro linijos dėl Doplerio reiškinio bus pasistūmusios į mėlynąjį spektro galą, o antrųjų – į raudonąjį. Bendro visos galaktikos spektro linijos dėl to išplinta. Išplitimo dydis priklauso nuo žvaigždžių skriejimo orbitomis greičių, o pastarieji tuo didesni, kuo stipresnis galaktikos gravitacinis potencialas $\varphi \approx GM/R$, kuris nusako galaktikos ***kompaktiškumą*** – jos masės M ir spindulio R santykį M/R (G – gravitacinė konstanta). Tad elipsinių galaktikų spektrų linijų pločiai leidžia nustatyti šių galaktikų mases bei kompaktiškumą.

Bet kurio poklasio elipsinę galaktiką daugiau ar mažiau apytiksliai galime vadinti sferine sistema. Todėl jos gravitacinė energija

$$E_g \approx -GM^2/R. \quad (8.3)$$

Virialo teorema teigia, kad

$$|E_g| = 2E_k. \quad (8.4)$$

Elipsinės galaktikos kinetinė energija E_k susideda iš atskirų žvaigždžių skriejimo individualiomis orbitomis energijų. Todėl

$$E_k \approx M\sigma_v^2/2, \quad (8.5)$$

čia σ_v yra atskirų žvaigždžių vidutinis kvadratinis greitis, kitaip sakant, žvaigždžių individualių greičių dispersija. Iš (8.3)–(8.5) sąryšių gauname

$$M \approx \sigma_v^2 R/G, \quad (8.6)$$

arba

$$\sigma_v^2 \approx GM/R. \quad (8.7)$$

Empiriškai buvo nustatyta, kad elipsinių galaktikų mėlynosios spektro srities (ryškio B) šviesis

$$L_B \sim M \quad (8.8)$$

ir spindulys

$$R \sim \sqrt{M}. \quad (8.9)$$

Vadinasi (žr. 8.7),

$$\sigma_v^2 \sim \sqrt{L_B}, \quad (8.10)$$

arba

$$L_B \sim \sigma_v^4. \quad (8.11)$$

Tai ***Faber ir Džeksono formulė***, pavadinta jos autorių JAV astronomų *S. M. Faber* ir *R. E. Jackson* vardu.

Taigi elipsinės galaktikos šviesis proporcingas jos žvaigždžių greičių dispersijai σ_v, pakeltai net ketvirtuoju laipsniu. Konkretus proporcingumo koeficientas priklauso nuo elipsinės galaktikos poklasio. Žinant, kad Doplerio reiškinio sukeltas visos galaktikos spektro linijų išplitimas $\Delta\lambda$ proporcingas σ_v, galima, remiantis (8.11), apskaičiuoti galaktikos šviesį, taigi ir absoliutinį ryškį, o kartu, pasinaudojus (8.1), ir jos nuotolį. Šiuo Faber ir Džeksono metodu galima gana patikimai nustatyti elipsinių galaktikų nuotolius iki 100 Mpc, o kai kuriais atvejais – mažesniu tikslumu ir iki 500 Mpc.

Maždaug iš briaunos matomoms spiralinėms galaktikoms irgi pavyko sukurti paprastą ir gana patikimą metodą, kaip pagal spektrą nustatyti galaktikos masę ir šviesį. Juk tokios galaktikos viena pusė dėl sukimosi apie ašį šios galaktikos centro atžvilgiu artėja mūsų link, o kita – tolsta. Artėjimo ar tolimo greitis, apskaičiuojamas iš Doplerio reiškinio, iš tikrųjų yra linijinis sukimosi greitis v_{rot}, priklausantis nuo nuotolio R iki galaktikos centro. Jei galaktikos vaizdas nėra labai silpnas ir mažas, pavyksta išmatuoti skirtingai

nuo centro nutolusių įvairių disko vietų v_{rot} ir tuo būdu sužinoti detalią v_{rot} priklausomybę nuo R, kuri vadinama galaktikos ***sukimosi kreive***. Iš mechanikos žinome, kad tarp apskritiminio greičio v_{rot}, orbitos spindulio R ir orbitos viduje esančios masės M yra toks sąryšis:

$$M = \frac{v_{rot}^2 R}{G}. \qquad (8.12)$$

Ši formulė gauta visiškai paprastai – gravitacijos jėgą prilyginus išcentrinei inercijos jėgai. Ji galioja, jei masė M yra pasiskirsčiusi sferiškai simetriškai. Taigi, šią formulę taikant spiralinių galaktikų diskų pakraščiams, reikalingos tam tikros pataisos. Matome, kad, naudojantis (**8.12**) sąryšiu, galima apskaičiuoti visos galaktikos masę, taip pat nustatyti masės pasiskirstymą spiralinės galaktikos centriniame telkinyje ir diske. Jei neįmanoma gauti atskirų galaktikos disko dalių spektro, tenkinamasi visos galaktikos bendru spektru. Remiantis jo linijų išplitimu, galima apskaičiuoti maksimalų sukimosi greitį $v_{rot} = v_{max}$. Tuomet neįmanoma nustatyti atskirų galaktikos dalių masės, nustatoma tik bendra visos galaktikos masė.

Taigi įsitikinta, kad kuo galaktika masyvesnė ir kompaktiškesnė, tuo ji greičiau sukasi. Kartu buvo įsitikinta, kad tokios galaktikos ir šviesis yra didesnis. Amerikiečiai R. Tulis (*R. B. Tully*) ir Dž. Fišeris (*J. R. Fisher*) empiriškai nustatė, kad spiralinės galaktikos mėlynasis šviesis

$$L_B \sim v_{max}^3. \qquad (8.13)$$

Proporcingumo koeficientas labai priklauso nuo galaktikos poklasio. Ši ***Tulio ir Fišerio*** vardu pavadinta ***formulė*** tokia pat svarbi nustatant spiralinių galaktikų nuotolius, kaip ir (**8.11**) nustatant elipsinių galaktikų nuotolius. Dopleriniam poslinkių skirtumui arba išplitimui nustatyti naudojama daug įvairių spektro linijų. Optiniame diapazone tai žvaigždžių spektro sugerties linijos ir H II sričių emisijos linijos. O geriausiai pasitarnauja H I sričių 21 cm bangos ilgio radijo emisijos linija.

Prieš 40–50 metų, kuomet dar nebuvo ištobulinti čia aprašytieji spektro linijų išplitimo bei poslinkių (galaktikos centro atžvilgiu) metodai, galaktikų mases buvo mėginama nustatyti skaičiuojant šviesiausias žvaigždes ir sumuojant jų mases (panaudojus mūsų Galaktikos šviesio funkciją). Netaisyklingosioms galaktikoms ir dabar šis metodas praktiškai tebėra vienintelis masių nustatymo metodas.

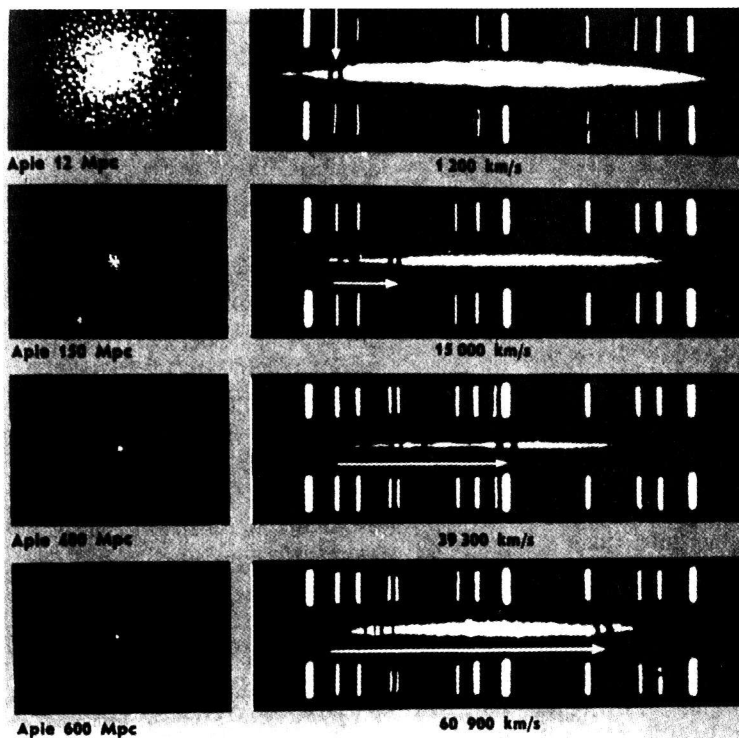
8.3.2. Hablo dėsnis

Absoliutinį ryškį palyginti patikimai galima priskirti tik daugeliui standartinių, į E. Hablo klasifikacijos sistemą gerai telpančių galaktikų, jei jos yra arčiau kaip 200–300 Mpc. O kaip nustatyti dar tolimesnių, taip pat pekuliariųjų galaktikų nuotolius?

Tokią galimybę gamta mums yra suteikusi: tam naudojamas vadinamasis Hablo dėsnis, kurį E. Hablas suformulavo 1929 m., remdamasis JAV astronomo Vesto Slaiferio (*V. M. Slipher*) 1912 m. pradėtais, o vėliau ir kitų astronomų atliktais daugelio galaktikų radialiųjų greičių nustatymais matuojant galaktikų spektro linijų doplerinius poslinkius. Paaiškėjo, kad tik pačių artimiausiųjų galaktikų spektro linijos yra pasislinkusios visiškai nedaug ir įvairiai – vienų galaktikų į mėlynąją spektro pusę, kitų – į raudonąją. Visų tolimesnių galaktikų spektro linijos yra pasislinkusios vien tik į raudonąją pusę ir tuo daugiau, kuo galaktika toliau. Tai vadinamasis galaktikų spektrų **raudonasis poslinkis** (žr. **8.23** pav.). Bangos ilgio pokyčio $\lambda - \lambda_0$ ir nepakitusios bangos ilgio λ_0 santykis

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \qquad (8.14)$$

yra vadinamas ***raudonojo poslinkio rodikliu***. Jis pastovus visoms to paties



8.23 pav. *Skirtingo nuotolio galaktikų spektrai – raudonojo poslinkio galaktikų spektruose iliustracija. Balta rodyklė rodo dvi Ca II rezonansines sugerties linijas, kurių laboratoriniai (Doplerio reiškinio nepakeisti) bangų ilgiai yra 393,4 nm ir 396,8 nm. Šios linijos elipsinių galaktikų spektruose esti pačios stipriausios. Galaktikų spektrus iš abiejų šonų gaubia standartinės emisijos linijos, gautos laboratorijoje*

spektro linijoms. Vadinasi, raudonąjį poslinkį sukelia Doplerio reiškinys, atsiradęs dėl to, kad visos galaktikos (išskyrus kai kurias artimąsias) tolsta nuo mūsiškės. Tolimo greitis v_r apskaičiuojamas pasinaudojus Doplerio reiškinio formule

$$v_r = c\frac{(z+1)^2-1}{(z+1)^2+1}, \qquad (8.15)$$

čia c yra šviesos greitis vakuume. Jei apytiksliai $v_r < 0{,}1\ c$, tai vietoj (8.15) galima naudotis apytiksle Doplerio reiškinio formule

$$v_r = cz. \qquad (8.16)$$

E. Hablas nustatė, kad galaktikų tolimo greitis proporcingas jų nuotoliams r:

$$v_r = Hr. \qquad (8.17)$$

Vėliau šis sąryšis buvo pavadintas ***Hablo dėsniu***. Proporcingumo koeficientas H nepriklauso nuo krypties į galaktiką. Jis buvo pavadintas ***Hablo konstanta***.

Hablo dėsnis nereiškia, kad mūsų Galaktika yra kažkokios didžiulės galaktikų sistemos centre ir stovi vietoje, o visos kitos galaktikos nuo jos bėga. Šis dėsnis reiškia, kad **stebimoji Mūsų Visatos dalis**, vadinamoji **Metagalaktika** (žr. 9.1), **plečiasi**, o plėtimosi pobūdis yra toks, jog nuotolių tarp galaktikų spiečių ir mažesnių grupių didėjimo greitis yra proporcingas patiems nuotoliams. Bet kurioje kitoje galaktikoje esančiam stebėtojui taip pat atrodys, kad jo galaktika nejuda, o visos kitos galaktikos (tarp jų ir mūsiškė) nuo jo bėga pagal tą patį Hablo dėsnį (8.17). Manoma kad šitaip plečiasi ir visa Mūsų Visata. Šis plėtimasis vadinamas ***Mūsų Visatos kosmologiniu plėtimusi***.

Galaktikos ne tik dalyvauja bendrame Mūsų Visatos plėtimesi. Jos taip pat dar juda individualiai. Pavyzdžiui, galaktikų spiečių ir mažesnių grupių nariai savomis sudėtingomis orbitomis skrieja savų spiečių ir grupių viduje, o spiečiai, grupės bei pavienės galaktikos irgi juda vieni kitų atžvilgiu. Šie netvarkingi judesiai dar labai mažai ištiri. Atrodo, kad jų greičiai dažniausiai siekia kelis ar keliolika šimtų km/s. Artimų galaktikų atveju (kuomet maždaug $r < 50$ Mpc) jie pastebimai iškraipo Hablo dėsnį (8.17).

Hablo konstantos H skaitmeninė vertė apskaičiuojama iš (8.15) ir (8.17) sąryšių įvairiais ankščiau aprašytais metodais nustačius daugelio galaktikų (išskyrus artimas) nuotolius r ir išmatavus tų pačių galaktikų raudonojo poslinkio rodiklius z. Analizuojant dėl nuotolio nustatymo paklaidų gautas gana skirtingas H vertes, apskaičiuojamas jų pasvertas vidurkis.

Skirtingais metodais nustatant galaktikų nuotolius, Hablo konstantos vertė gaunama maždaug tarp $90\ \mathrm{km{\cdot}s^{-1}{\cdot}Mpc^{-1}}$ ir $50\ \mathrm{km{\cdot}s^{-1}{\cdot}Mpc^{-1}}$. Panašu, kad labiausiai tikėtina yra ši jos vertė:

$$H_0 = 70\ \mathrm{km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}} \qquad (8.18)$$

Indeksas „0“ reiškia, kad čia turima galvoje šiuolaikinė *H* vertė. Juk ji galbūt keičiasi Mūsų Visatai plečiantis.

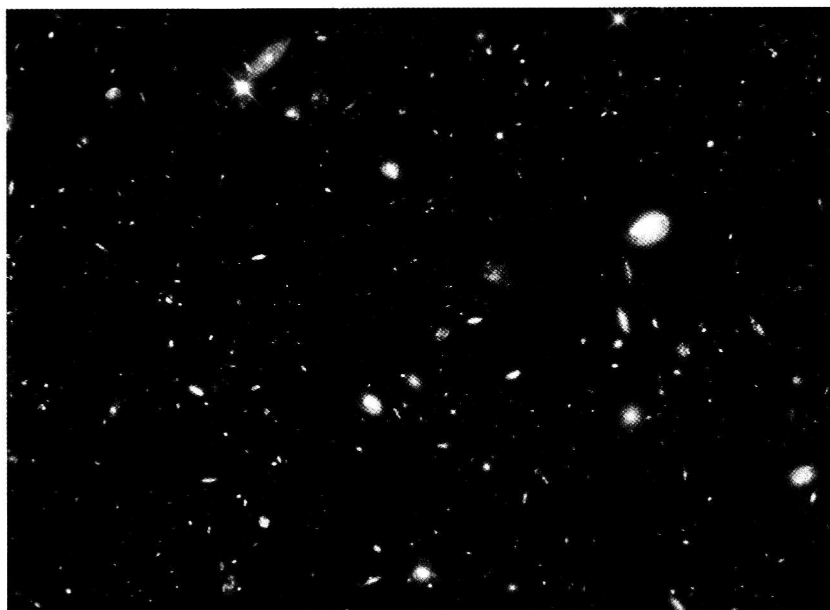
Priėmus konkrečią *H* vertę, Hablo dėsnis (**8.17**) puikiai tinka tolimų galaktikų nuotoliams nustatyti.

Šiandien astronomai jau pajėgia stebėti tokius tolimus Visatos objektus, kai jų tolimo greičiai siekia daugiau negu 95% šviesos greičio. Tokių tolimų objektų spektrai pasidarę visiškai nepanašūs į artimų galaktikų spektrus. Juk viso spektro bangų ilgiai dėl Doplerio reiškinio yra padidėję $z + 1$ kartų. Tai aišku iš (**8.14**):

$$z+1=\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}+1=\frac{\lambda}{\lambda_0}. \qquad (\mathbf{8.19})$$

Pavyzdžiui, jei $z = 6$, visi bangų ilgiai yra padidėję 7 kartus. Dėl to ne tik visi regimosios šviesos spinduliai, bet ir didelė dalis UV spindulių, įskaitant ir Laimano serijos α liniją, yra nuslinkę į IR spindulių sritį.

Toliausiai žvilgterėti leido Hablo kosminis teleskopas. Būtent 1995 m. gruodyje pro šį teleskopą net 10 parų buvo stebimas mažytis (2′,5 skersmens) dangaus lopinėlis Grįžulo Ratų žvaigždyne. Buvo padarytos 342 ekspozicijos. Jų trukmė – po 15–40 min. Sukaupiama informacija Žemėje buvo sumuojama. Pagaliau CCD nuotraukoje ėmė matytis net 30-jo ryškio galaktikos. Taip



8.24 pav. *Pirmoji „gili“ Visatos nuotrauka Grįžulo Ratų žvaigždyne, netoli šviesios NGC 4605 galaktikos. Tai Hablo kosminiu teleskopu 1995 m. gautos 2,5 x 2,5 kampinių minučių dangaus sklypelio CCD nuotraukos didesnioji dalis. Nuotraukoje vos kelios silpnutės žvaigždės ir beveik 2000 labai tolimų galaktikų iki 30-jo ryškio!*

buvo gauta vadinamoji pirmoji „gilaus lauko“ (angl. *deep field*) nuotrauka (žr. **8.24** pav.), kuri vėliau dar buvo „gilinama“ stebint infraraudonaisiais spinduliais. Dangaus lopinėlis „giliai“ nuotraukai buvo specialiai parinktas. Jis toli nuo gausiomis žvaigždėmis švytinčio Paukščių tako. Jo kryptimi mūsų Galaktikos erdvė gana skaidri – neužtikta tarpžvaigždinės medžiagos debesų. To meto veikiantys didžiausieji antžeminiai teleskopai ten nebuvo aptikę ir svetimų galaktikų. Taigi Hablo kosminiu teleskopu imta stebėti atrodytų visiškai tuščią dangaus plotelį. Ir štai paaiškėjo, kad jis tiesiog sėte nusėtas tolimų nedidelių galaktikų – jų ten beveik 2000 (žr. **8.24** pav). Vadinasi, Mėnulio diskas, kurio skersmuo 32′, matyt, užstoja net milijoną tolimų galaktikų. Jei visomis kryptimis tolimų galaktikų vienodai gausu, visame danguje jų iki 30-jo ryškio turėtų būti per 100 milijardų. Pavyko nustatyti, kad vienos 28-jo ryškio galaktikos raudonojo poslinkio rodiklis $z = 6{,}68$. Pasinaudoję (**8.15**), Hablo dėsniu (**8.17**) ir (**8.18**), gauname šios galaktikos tolimo greitį $v_r = 0{,}967c$ bei nuotolį $r = 4{,}143 \cdot 10^9$ pc = $13{,}5 \cdot 10^9$ šm. Tai reiškia, kad mes šią galaktiką matome tokią ir ten, kokia ir kur ji buvo prieš 13,5 milijardų metų, kuomet buvo išspinduliuoti tie fotonai, kurie tik dabar pasiekė mūsų aparatūrą. Atrodo, kad daugelis šioje „gilioje“ nuotraukoje vos matomų silpnų galaktikų irgi yra labai tolimos, jų raudonojo poslinkio rodikliai z turėtų siekti 6 ar net 7.

1998 m. kosminiu Hablo teleskopu panašiu būdu gauta kita „gili“ Visatos nuotrauka priešingoje dangaus pusėje Tukanos žvaigždyne (žr. **8.25** pav.). Ten irgi gausu labai tolimų galaktikų.

Tačiau čia pateiktas nuotolio pavyzdys, gautas pasinaudojus Hablo dėsniu (**8.17**), tėra tik apytikslis, orientacinis. Mat naudojantis Hablo dėsniu, galima su pakankamu tikslumu nustatyti galaktikų nuotolius, kol maždaug $z < 0{,}5$ ar $z < 1$. Esant didesniems nuotoliams, gali atsirasti sisteminės paklaidos dėl nežinojimo, kokia geometrija (pavyzdžiui, Euklido, Rimano, Lobačevskio ar dar kitokia) tinka Mūsų Visatai. Taip pat kuo tolimesnį objektą stebime, tuo į gilesnę praeitį žvelgiame. Vadinasi, reikia žinoti, kaip praeityje keitėsi H konstantos skaitmeninė vertė, kurios keitimasis priklauso nuo Visatos plėtimosi greičio kitimo.

Į visa tai bandoma atsižvelgti kuriant vadinamuosius kosmologinius modelius, kurių tikslas – išaiškinti bendruosius Mūsų Visatos sandaros, jos kilmės ir evoliucijos dėsningumus. Kosmologiniai modeliai kuriami remiantis stebėjimų duomenimis ir naujausiomis fizikos bei matematikos žiniomis. Apie juos dar truputį kalbėsime **9.7** poskyryje. Remiantis atskirais (deja, kol kas dar gana skirtingais) modeliais sudaromos formulės, leidžiančios apskaičiuoti net ir labai tolimo objekto atstumą r, jei yra išmatuotas šio objekto spektro raudonojo poslinkio rodiklis z.

Taigi labai tolimų galaktikų ir kvazarų atstumams apskaičiuoti reikia: 1) išmatuoti jų spektrų raudonojo poslinkio rodiklį z, 2) pasirinkti kurią nors konk-



8.25 pav. *Antroji „gili" Visatos nuotrauka, gauta Hablo kosminiu teleskopu Tukanos žvaigždyne 1998 m.*

rečią Hablo konstantos H skaitmeninę vertę ir 3) pasirinkti kurį nors konkretų Visatos kosmologinį modelį. O jau vėliau, žinant atstumą, sakytume, visiškai lengva, pasinaudojus (**8.1**), apskaičiuoti tolimojo objekto absoliutinį ryškį M, vadinasi, ir šviesį L. Tačiau aiškėja, kad čia irgi reikalinga papildoma procedūra.

Būtent Visatos plėtimasis papildomai susilpnina labai tolimų objektų spindesį. Kaip prisimename, šviesulio spindesiu J vadinama jo sukelta apšvieta, jei apšviestasis paviršius yra statmenas krypčiai į šviesulį: $J = L/4\pi r^2$. Tačiau šis apšvietos dėsnis galioja tik nejudančių spinduliavimo šaltinių atveju. O jei šis šaltinis dideliu greičiu nuo mūsų tolsta, tai jo sukelta apšvieta

$$J = \frac{L}{4\pi r^2} \cdot \frac{1}{z+1} \cdot \frac{1}{z+1}. \qquad (8.20)$$

Du silpninantys daugikliai $1/(z + 1)$ atsiranda dėl šių dviejų priežasčių: 1) dėl Doplerio reiškinio stebėtoją fotonai pasiekia būdami $z + 1$ kartą ilgesnių bangų, t. y. $z + 1$ kartą mažesnės energijos negu išspinduliavimo momentu (žr. (**8.19**). Tai ***fotonų energijos mažėjimo efektas;*** 2) jei spinduliavimo metu fotonų šaltinis nuo mūsų tolsta, per tam tikrą fiksuotą laiką, pavyzdžiui 1 s, mus pasiekia $z+1$ kartą mažiau fotonų, negu jų per 1 s išspinduliuoja šaltinis. Taip atsitinka todėl, kad vėliau išspinduliuotam fotonui iki mūsų tenka lėkti ilgesnį kelią. Dėl to jis ilgiau sugaišta. Laiko tarpai tarp

mus pasiekiančių fotonų pailgėja $z+1$ kartą palyginti su laiko tarpais tarp tų pačių fotonų išspinduliavimo aktų. Tai ***fotonų skaičiaus sumažėjimo efektas***. (Šie abu efektai nereiškia, kad negalioja energijos tvermės dėsnis. Galima sakyti, kad sumažėjusios energijos dalis įstringa, kaupiasi besiplečiančioje erdvėje.)

Matome, kad šviesulio teigiamas spindulinis greitis $(z + 1)^2$ kartų susilpnina jo spindesį:

$$J = \frac{J_s}{(z+1)^2}. \qquad \text{(8.21)}$$

Čia J yra mūsų išmatuotas, t. y. spindulinio greičio susilpnintas spindesys, o J_s – spindesys, kurį išmatuotume, jeigu šviesulys būtų tame pačiame nuotolyje r, kurį mes nustatėme, ir jis nuo mūsų netoltų, taigi jeigu Visata nesiplėstų, būtų stacionari. Pasinaudoję Pogsono formule (**5.11**), iš (**8.21**) gauname:

$$m_s = m - 5\lg(z+1). \qquad \text{(8.22)}$$

Čia vėlgi m yra mūsų išmatuotas regimasis ryškis, m_s – regimasis ryškis, kurį išmatuotume, jeigu Visata nesiplėstų.

Tačiau (**8.22**) – tai dar ne visas sąryšis. Dar reikalinga pataisa K (ji gali būti ir teigiama, ir neigiama), kuria būtų įvertinta, jog į aparatūros registruojamą bangų ilgių intervalą dėl raudonojo poslinkio patenka kitos, kartais gana tolimos spektro srities fotonai. Aišku, kad pataisa K priklauso ir nuo aparatūros registruojamų bangų ilgių intervalo, ir nuo z vertės. Įvertinus pataisą K ir panaudojus (**8.22**), galutinė formulė, pagal kurią galima apskaičiuoti labai tolimo objekto absoliutinį ryškį, vietoj (**8.1**), turi šitokį pavidalą:

$$M = m - A - K - 5\lg(z+1) - 5\lg r + 5. \qquad \text{(8.23)}$$

Skaičius $z + 1$, nusakydamas, kiek kartų pailgėjusios bangos pasiekia stebėtoją, kartu nusako, kiek kartų visi atstumai Visatoje buvo mažesni už dabartinius tuo metu, kai buvo išspinduliuojami dabar mus pasiekiantys fotonai. Taip pat šis skaičius gali tikti ir Mūsų Visatos evoliucijos momentų datavimui. Netiesioginiu būdu jis nusako ir nuotolį, iš kurio mus pasiekė stebimosios elektromagnetinės bangos. Pavyzdžiui, stebėdami tolimiausias dabar žinomas galaktikas, kurių $z = 6$ ar net $z = 7$, mes jas matome tokias, kokios jos buvo tuomet, kai visi atstumai Vistoje buvo 7 ar 8 kartus mažesni.

Turime pastebėti, kad astronomų nustatomi labai tolimų objektų atstumai pasižymi savotiška ypatybe. Tai nuotoliai nuo dabartinės mūsų Galaktikos vietos iki tos vietos, kurioje buvo tiriamasis spinduolis ne dabar, o tolimoje praeityje. Dabar jis yra daug toliau, tačiau dabartinės jo būklės mes negalime matyti.

8.4. AKTYVIOSIOS GALAKTIKOS

Tai milžiniškos spiralinės ar elipsinės galaktikos, kuriose visų galaktikos žvaigždžių spinduliuojamai energijai beveik prilygsta arba yra net daug kartų didesnė už ją papildoma nešiluminės kilmės energija, išsiskirianti labai mažoje centrinėje galaktikos dalyje. Ši papildoma energija pasireiškia trimis **8.4.1** skirsnyje aprašomais būdais.

8.4.1. Trys aktyvumo formos

8.4.1.1. Branduoliai

Aktyviosios galaktikos centrinė dalis skleidžia nepaprastai stiprų, labai didelio tankio nežvaigždinės kilmės spindulių srautą. Dėl to pačiame galaktikos centre gali būti matoma ypač didelio skaisčio dėmelė, tarytum kažkokia superžvaigždė, kurios spinduliavimo galia neretai beveik prilygsta visai galaktikai, o kai kuriais atvejais net ją daug pralenkia ir nustelbia. Ši skaisti dėmelė vadinama galaktikos ***aktyviuoju branduoliu*** arba tiesiog ***branduoliu***. Jo spektras yra ištisinis. Jis prasideda centimetrinėmis radijo bangomis ir baigiasi gama spinduliais.

Koks branduolio skersmuo? Aktyviųjų galaktikų vaizduose, gautuose elektroniniais prietaisais, o ypač paprastose fotografinėse nuotraukose branduoliai gali atrodyti labai dideli. Kartais jie uždengia net didžiąją galaktikos vaizdo dalį. Tačiau tai nėra tikrasis jų skersmuo. Juk mažų matmenų vaizdai, jei į juos krinta didelio tankio spindulių srautas, yra išplitę dėl šviesos difrakcijos, kurią sukelia teleskopų reflektorių vamzdžių viduje esančios neišvengiamos kliūtys spindulių kelyje. Dar daugiau mažų matmenų vaizdus gali išplėsti spindulių sklaida fotografinėje emulsijoje. Panašiai yra ir stebint žvaigždes – kuo didesnio spindesio žvaigždė, tuo didesnį jos vaizdą užfiksuoja aparatūra, nors žvaigždės, jas stebint paprastais, virš atmosferos neiškeltais arba į sistemas nesujungtais teleskopais, dėl savo kampinių skersmenų neapčiuopiamo mažumo yra lyg taškiniai šaltiniai.

Tikrojo branduolių skersmens viršutinę ribą nurodo branduolių spinduliavimo galios kitimas laikui bėgant. Paaiškėjo, kad branduolių šviesis nuolatos padrikai svyruoja, per mėnesius, savaites ar vos per kelias dienas gerokai padidėdamas ir vėl sumažėdamas. Tokie pokyčiai siekia kelis ar keliasdešimt procentų, o kai kada net kelis kartus. Pokyčių greitumas rodo nepaprastą spinduliuojančio tūrio mažumą – jo skersmuo negali būti didesnis už atstumą, kurį šviesa nuskrieja per trumpiausią pokyčio laiką. Iš didžiulio nuotolio tokio mažo skersmens neįmanoma išmatuoti. Tuo labiau neįmanoma įžiūrėti ir kokių nors branduolio detalių. Apie aktyviųjų galaktikų branduolių fizikinę prigimtį kalbėsime **8.4.3** ir **8.4.4** skirsniuose.

8.4.1.2. Emisijos linijos

Daugelio aktyviųjų galaktikų spektruose matomos labai stiprios emisijos linijos, o tai nebūdinga paprastoms galaktikoms (žr. **8.26**, **8.31–8.34** pav.). Vienos šių linijų yra labai plačios, kitos vidutinio pločio.

Stiprių ir labai plačių emisijos linijų buvimas aiškinamas tuo, kad aktyviųjų galaktikų branduolius gaubia gausūs ir palyginti didelio tankio dujų debesys. Jie sugeria dalį branduolio spinduliuojamos didžiulės energijos ir dėl to įkaista iki keliolikos ar keliasdešimt tūkstančių K. Vandenilio ir helio atomai visiškai jonizuojami, sunkesni atomai jonizuojami po keletą kartų. Rekombinacijos metu atsidūrę aukštuose energijos lygmenyse, visi šie atomai skleidžia emisijos linijas. Arčiau nei 0,5 pc nuo branduolio susidarę (gal ten patekę?) debesys sugeria tiek daug iš branduolio sklindančios spindulių energijos ir tuo pačiu iš sugertųjų fotonų atima tokį didžiulį tolyn nuo centro nukreiptą impulsą (tai šviesos slėgis), kad ima lėkti galaktikos pakraščių link tūkstančių ir net dviejų trijų dešimčių tūkstančių km/s greičiu. Atskirų debesų emisijos linijos nėra plačios. Tačiau mes registruojame susiliejusias daugybės į skirtingas puses lekiančių debesų linijas. Dėl to Doplerio reiškinys jas išplečia. Tarp šių labai išsiplėtusių linijų nėra draustinių linijų. Tai reiškia, kad šie debesys daug didesnio tankio negu molekuliniai tarpžvaigždinės medžiagos debesys.

Kiti autoriai teigia, kad emisijos linijos galėtų tiek daug išsiplėsti ir dėl labai greito, galinčio siekti tūkstančius km/s šių debesų skriejimo apie masyvų branduolį. O gal veikia abi linijų išplitimo priežastys?

Tarpus tarp debesų užpildo tūkstančius kartų mažesnio tankio dujos, įkaitusios iki dešimčių ar šimtų milijonų laipsnių. Tai rodo daug kartų jonizuotų atomų, pavyzdžiui, Fe VII, Fe XI emisijos linijos. Šių karštų dujų slėgis prilygsta debesų vidiniam slėgiui. Taip apsaugomi debesys nuo staigaus išsiplėtimo ir išsisklaidymo.

Toliau, kelių pc nuotolyje nuo branduolio, atsidūrusius dujų debesis perskrodžia jau daug silpnesnis branduolio spindulių srautas. Todėl jie, absorbuodami branduolio fotonus, gauna daug silpnesnį impulsą ir lekia tolyn nuo branduolio daug mažesniu (apie 500 km/s) greičiu. Vadinasi, jų spektro emisijos linijos jau daug siauresnės. Daug mažesnis ir šių debesų tankis – artimas mūsų Galaktikos molekulinių debesų tankiui. Todėl jų spektre matyti daug stiprių draustinių linijų. Mažesnio tankio debesis lengviau jonizuoti. Dėl šios aplinkybės jų jonizacija išlieka tokia pati kaip ir branduolį artimai gaubiančių debesų.

Yra aktyviųjų galaktikų, kuriose plačiųjų emisijos linijų visai nesimato. Smarkiai spindi vien tik šios vidutiniosios.

8.4.1.3. Čiurkšlės ir plazmoidai

Dalis aktyviųjų galaktikų, būtent vadinamosios radijo galaktikos (žr. **8.4.2.2**) ir radijo kvazarai (žr **8.4.2.3**), turi po dvi milžiniškas į priešingas puses trykštančias elementariųjų dalelių, atomų branduolių ir fotonų ***čiurkšles***, kurių viršūnės labai išplitusios ir virtusios gigantiškais, dažniausiai už pačią galaktiką daug didesniais plazmos debesimis – ***plazmoidais*** (žr. **8.27–8.30** pav.). Čiurkšlės, matyt, prasideda pačiame branduolyje ir iš pradžių esti nesusekamos, plonos – vos parseko dalių storio. Palaipsniui išsiskleisdamos ir dėl to vis storėdamos, jos tęsiasi per visą galaktikos tūrį ir išsiveržia toli į tarpgalaktinę erdvę. Čia jos jau yra kelių šimtų ar tūkstančių pc storio. Dar labiau išplisdamos ir virsdamos plazmoidais, jos gali pasiekti kelių dešimčių ar kelių šimtų kpc, o rekordiniais atvejais net kelių Mpc nuotolius nuo pačios galaktikos.

Plazmoidai stipriai skleidžia ištisinio spektro dekametrines ir metrines bangas. Sparčiai silpnėdamas, jų spektras dar nusitęsia per centimetrines ir milimetrines radijo bangas. Čiurkšlių spektras irgi ištisinis, tačiau jis nusitęsia ne tik per radijo bangų, bet ir per infraraudonųjų, o retkarčiais ir per regimosios šviesos bei ultravioletinių spindulių sritis. Aptikta čiurkšlių, kurių ištisinis spektras apima ir Rentgeno bei gama spindulių diapazonus. Apie branduolių, čiurkšlių ir plazmoidų ištisinio spektro prigimtį kalbėsime **8.4.3** skirsnyje.

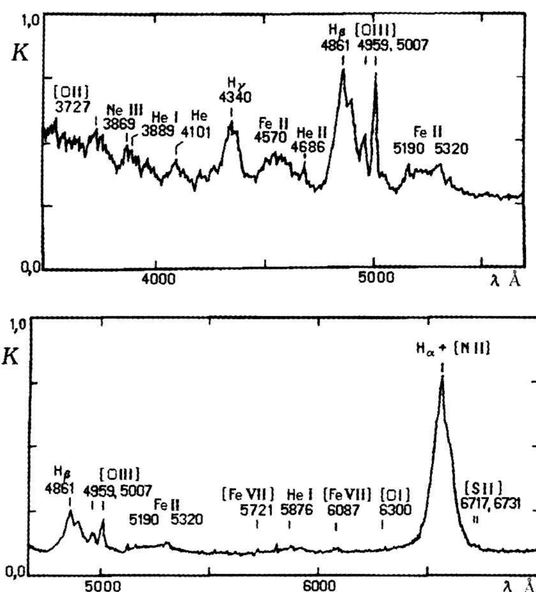
8.4.2. Trys aktyviųjų galaktikų rūšys

8.4.2.1. Seiferto galaktikos

Jos taip pavadintos amerikiečių astronomo Karlo Seiferto (*C. K. Seyfert*) vardu. Jis šių galaktikų pirmąsias atstoves aptiko ir pradėjo tirti 1943 m. Dabartiniais vertinimais Seiferto galaktikos sudaro keletą procentų visų spiralinių ir skersinių spiralinių galaktikų. Jos pasižymi stipriomis emisijos linijomis bei labai galingu ištisinio spektro branduoliu. Čiurkšlės ir plazmoidai menki arba jų visiškai nėra.

Skiriami du Seiferto galaktikų poklasiai, žymimi **Sy 1** ir **Sy 2**. Pirmojo poklasio galaktikų spektruose matosi minėtosios abiejų rūšių emisijos linijos – ir plačiosios, ir vidutinio pločio (žr. **8.26** pav.), o Sy 2 galaktikų spektruose – vien tik vidutiniosios. Taip pat Sy 1 galaktikų branduoliai spinduliuoja daug galingiau negu Sy 2 galaktikose. Daugelis Sy 1 galaktikos branduolių skleidžia daugiau energijos negu visa likusi galaktikos dalis. O Sy 2 galaktikos branduolys paprastai esti silpnesnis už visą kitą galaktikos dalį.

Ypač galingai Seiferto galaktikų branduoliai skleidžia infraraudonuosius spindulius (tai matyti **8.37** pav.). Pavyzdžiui, galaktikos NGC 1068 branduolio šviesis optiniame diapazone (tarp 300 ir 700 nm) yra $5{\cdot}10^{34}$ W, o IR diapazone



8.26 pav. *Seiferto galaktikos (Sy 1 poklasio) Akn 120 spektro registrograma. Pažymėtos kai kurios svarbiausios emisijos linijos. Vienos jų labai plačios, kitos vidutinio pločio. Tarp pastarųjų yra ir draustinių (pažymėtų laužtiniais skliausteliais) linijų. K – spektrofotometro parodymai, priklausantys nuo spinduliuotės srauto*

net $2 \cdot 10^{37}$ W. Visos galaktikos optinis šviesis yra 10^{37} W ($M_V = -21^m,3$). Taigi vien tik IR diapazone branduolys skleidžia daugiau energijos negu visos galaktikos žvaigždės. Manoma, kad nemažą IR spindulių dalį sukuria labai gausių dulkelių šiluminis spinduliavimas.

Rentgeno srityje (2–10 keV energijos intervale) Seiferto galaktikų branduolių spinduliavimo galia siekia 10^{35}–10^{38} W. O Seiferto galaktikų radijo bangos nėra ypač galingos. Jos tik dešimtis kartų galingesnės negu paprastų spiralinių galaktikų radijo bangos ir prilygsta milžinių bei supermilžinių elipsinių galaktikų radijo bangoms. Jų galia esti 10^{31}–10^{34} W.

Seiferto galaktikos iš paprastų spiralinių galaktikų dažnai išsiskiria ir padidintu mėlynųjų bei ultravioletinių spindulių kiekiu.

8.4.2.2. Radijo galaktikos

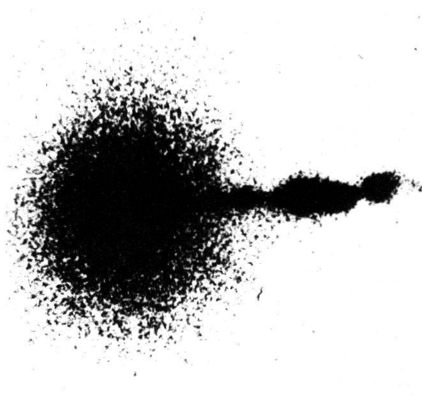
Tai tokios elipsinės galaktikos supermilžinės, kurios kartu yra ir labai galingi radijo bangų šaltiniai. Jos turi visus tris aktyvumo požymius: ir nežvaigždinės kilmės centrinį branduolį, ir emisijos linijas, ir čiurkšles su milžiniškais plazmoidais.

Iš plazmoidų dažniausiai ir sklinda didžioji radijo bangų energijos dalis. Taigi radijo bangas spinduliuoja nepaprastai didelis tūris, dešimtis, šimtus ir tūkstančius kartų didesnis už žvaigždinį galaktikos tūrį, tai yra už tą mums



8.27 pav. *Artimiausioji radijo galaktika Kentauro A, arba NGC 5128. Iki jos 3,5 Mpc. Baltos vingiuotos linijos – tai radijo izofotos, rodančios dvi čiurkšles, išplintančias į plazmoidus – plazmos debesų užpildytas sritis, iš kurių sklinda radijo bangos. Čia pavaizduotos tik centrinės, didesnio radijo skaisčio sritys. Silpniau radijo bangas skleidžiančios plazmoidų viršūnės nusitęsia kelis kartus toliau – iki 150 kpc nuo galaktikos centro. Galaktikos centre yra nežvaigždinės kilmės spindulių šaltinis, kurio ištisinis spektras tęsiasi nuo radijo bangų per visą elektromagnetinių bangų skalę, apimdamas ir gama spindulius. Ypač stipriai jis skleidžia Rentgeno spindulius. Manoma, kad ši milžiniška pekuliari elipsinė galaktika yra dviejų spiralinių galaktikų (galbūt spiralinės ir elipsinės) susiliejimo rezultatas. Būta ir mažesnių galaktikų įkritimų. Tarpžvaigždinės medžiagos ji turi daugiau negu paprastos spiralinės galaktikos. Tai, pavyzdžiui, rodo labai plati netaisyklinga tamsi dujų ir dulkių mišinio juosta. Hablo kosminis teleskopas šios galaktikos centre aptiko 40 pc skersmens jonizuotų dujų diską. Tai akrecinis diskas aplink maždaug milijardo saulių masės juodąją bedugnę. Panašu, kad pastaroji tokia masyvi tapo susiliejus abiem susidūrusių galaktikų centruose buvusioms juodosioms bedugnėms ir dar prisigrobus labai daug susidūrimo metu per arti patekusių žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos*

įprastą tūrį, iš kurio sklinda žvaigždžių šviesa. Stebint radijo bangas skleidžiančio tūrio piešinį, dažniausiai matyti būdinga triguba struktūra – palyginti mažytis (normalaus, žvaigždžių užpildyto galaktikos tūrio didumo) ***centrinis radijo šaltinis*** ir jį iš priešingų pusių lydintys du milžiniški plazmoidai, kurie sudaro du ***išorinius radijo šaltinius***, tarytum kokias didžiules, dažniausiai gana pailgas, nebūtinai tiesias ausis. Daugelio radijo galaktikų „ausų“

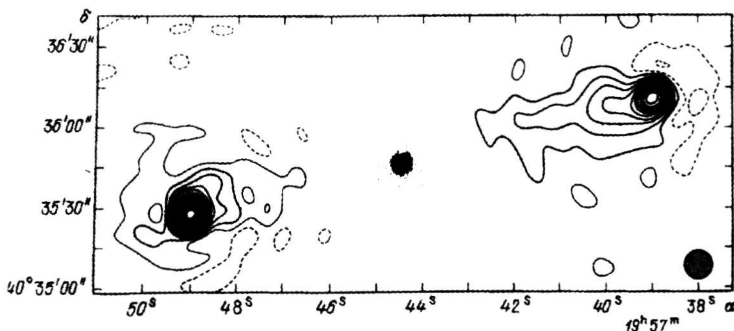


8.28 pav. *Radijo galaktikos Mergelėje M 87 (žiūr.* **8.12** *pav.) maža centrinė sritis (trumpo išlaikymo negatyvinė nuotrauka). Čia matomos čiurkšlės projekcijos į regėjimo krypčiai statmeną plokštumą ilgis yra 1,8 kpc. Matosi atskiri skaisčiau šviečiantys mazgai. Panašiai čiurkšlė atrodo ir IR, UV bei Rentgeno spinduliuose. O radijo bangos rodo, kad čiukšlė yra daug ilgesnė ir tęsiasi iki 80 kpc*

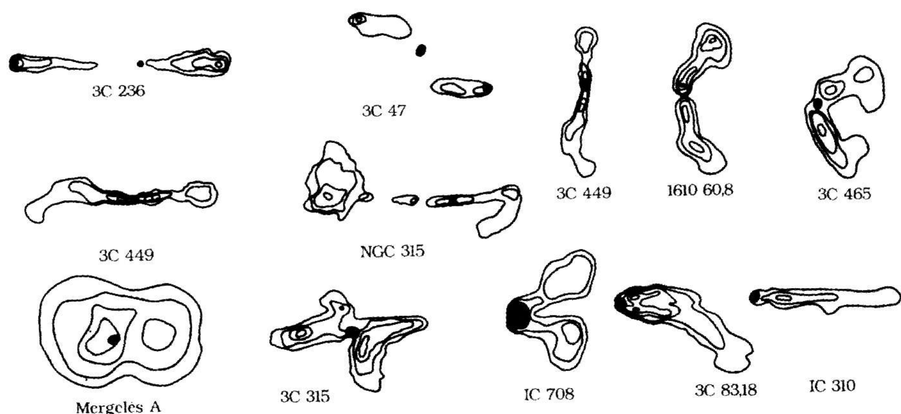
pagrindas, artėdamas prie centrinio šaltinio, palaipsniui susiaurėja iki vos keleto kpc ar dar labiau, taigi virsta plona radijo, o kartais ir trumpesnes elektromagnetines bangas skleidžiančia juostele. Tai ir yra minėtoji čiurkšlė, išilgai kurios branduolio energija pernešama į plazmoidus. Ši susiaurėjusi juostelė gali likti ir nesusekta. Tuomet radijo „ausys“ atrodo toli atitrūkusios nuo žvaigždžių užpildyto galaktikos tūrio. Radijo galaktikų pavyzdžių pateikta **8.27–8.30** pav.

Centrinis radijo šaltinis savo ruožtu irgi sudarytas iš dviejų dalių – silpniau už plazmoidus, tačiau stipriau už paprastas elipsines galaktikas radijo bangas skleidžia visas žvaigždinis galaktikos tūris, o šiame fone dar išsiskiria stiprus palyginti artimos branduolio aplinkos radijo spinduliavimas.

Paties branduolio ištisinis spektras tęsiasi beveik per visą elektromagnetinių bangų skalę iki pat gama spindulių. Savo ištisinio spektro pobūdžiu ir greitu šviesio kitimu radijo galaktikų branduoliai labai panašūs į Seiferto galaktikų branduolius, tik silpnesni.



8.29 pav. *Radijo galaktikos Gulbės A, arba 3C 405, plazmoidai. Tamsi dėmė paveikslo centre – žvaigždžių užpildytas galaktikos tūris. Registruotos 6 cm ilgio radijo bangos. Užbrūkšniuotas skrituliukas dešinėje apačioje rodo naudotos aparatūros skiriamąją gebą. Jei registruojamos ilgesnės radijo bangos, radijo skaisčio izofotos siaurėjančių juostelių pavidalu pasiekia pačią galaktiką, taigi parodo, kad yra dvi priešingų krypčių čiurkšlės, pernešančios materiją iš galaktikos centro į plazmoidus, kurie šios ir kai kurių kitų radijo galaktikų atveju baigiasi padidėjusio skaisčio sritimis – vadinamosiomis „karštosiomis dėmėmis“*

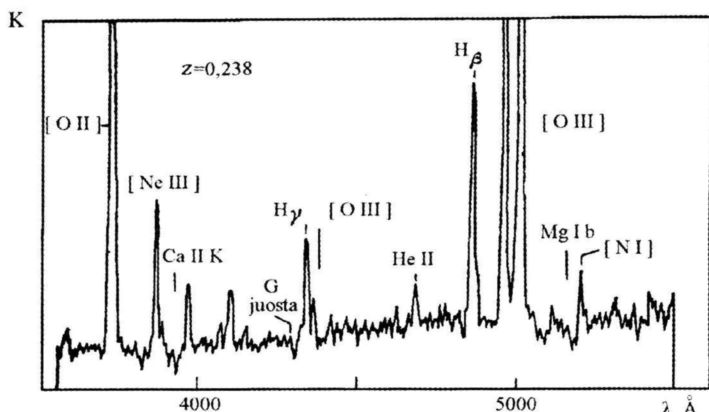


8.30 pav. *Įvairių radijo galaktikų radijo skaisčio izofotos, parodančios čiurkšles ir plazmoidus*

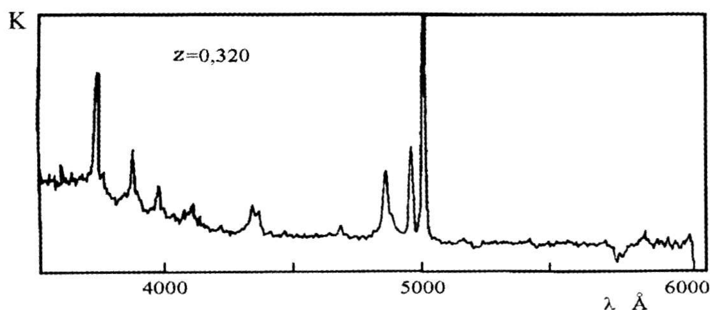
Beveik visų radijo galaktikų spektruose irgi aptiktos tokios pat vidutinio pločio linijos, kaip ir Sy 2 poklasio Seiferto galaktikų spektruose. Tai rodo, kad ir radijo galaktikų branduolius gaubia dujų debesys, kurie tolsta nuo branduolio šimtų km/s greičiais. Daug rečiau pasitaiko tokių radijo galaktikų, kurios savo emisijos linijų pločiu prilygsta net Sy 1 galaktikoms. Jose dujų debesys lekia tolyn nuo branduolio tūkstančių km/s greičiais.

Tarpžvaigždinės medžiagos gausumu radijo galaktikos skiriasi nuo kitų elipsinių galaktikų, kuriose tarpžvaigždinės medžiagos aptinkame mažai. Gal tarpžvaigždinės medžiagos buvimas yra būtina sąlyga aktyviajam galaktikos branduoliui susidaryti?

Griežtai kalbant, radijo bangų šaltiniai yra praktiškai visos galaktikos. Tik



8.31 pav. *Radijo galaktikos 3C 171 su labai galingu branduoliu spektro registrograma. Raudonojo poslinkio rodiklis z = 0,238. Emisijos linijos susidarė aktyvųjį branduolį apsupusiuose dujų debesyse, o sugerties – šios galaktikos žvaigždėse. K – spektrofotometro parodymai, priklausantys nuo spinduliuotės srauto*



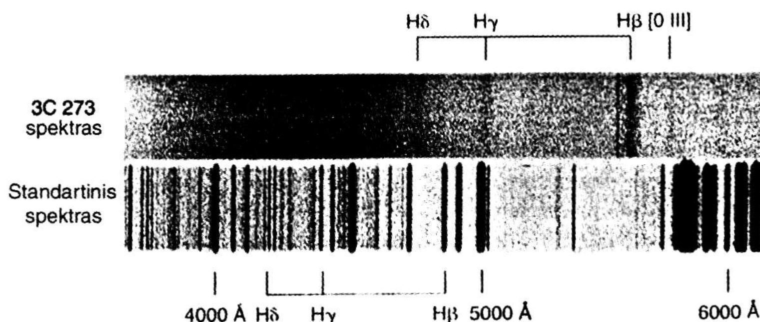
8.32 pav. *Radijo kvazaro 3C 277.1 spektro registrograma. z = 0.320. Matosi daugelis tų pačių emisijos linijų kaip ir radijo galaktikų spektruose. Kvazarams būdingas nedidelis sustiprėjimas UV srityje. Jis matomas ir* ***8.37*** *pav.*

dauguma šių šaltinių gana silpni. Prie silpnųjų radijo šaltinių priskirtina ir mūsų Galaktika. Jos spinduliavimo galia radijo bangų diapazone $L_r = (4–5)\cdot 10^{31}$ W. Kitų milžinių ir supermilžinių spiralinių galaktikų radijo bangų galia irgi yra tarp 10^{30} ir 10^{32} W. Milžinių ir supermilžinių elipsinių galaktikų radijo bangų galia siekia $10^{31}–10^{34}$ W. Radijo galaktikoms būdingas $10^{34}–10^{38}$ W galios radijo spinduliavimas.

8.4.2.3. Kvazarai ir kvazarinės galaktikos

Kvazarai – tai ypač galingai spinduliuojantys aktyvių galaktikų branduoliai, savo milžinišku šviesiu daug kartų pralenkiantys pačią aplinkinę galaktiką, ją visiškai nustelbiantys.

Visos kvazarinės (savo centruose turinčios kvazarus) galaktikos yra nepaprasatai toli. Jų nuotoliai $r > 2{,}6\cdot 10^8$ pc, o dar dažniau $r > 10^9$ pc. Todėl fotografiniuose arba elektroniniais prietaisais prieš keliolika metų gautuose vaizduose kvazarai atrodydavo kaip žvaigždės – kvazarą supančios galaktikos paprastai nesimatydavo arba beveik nesimatydavo. Tik nedaugeliu atvejų, tai-



8.33 pav. *Istorinė kvazaro 3C 273 spektro (viršuje) nuotrauka (negatyvinė), padėjusi atrasti naują nepaprastai galingų objektų klasę – kvazarus*

kant specialią tyrimų metodiką, pavykdavo įsitikinti, kad kvazarus tikrai supa galaktikos, dažniausiai labai galingos. Kvazarų vaizdų panašumas į žvaigždžių vaizdus ir nulėmė jų sutrumpintą pavadinimą, kilusį iš angliškų žodžių *quasi stellar radio source* – kvazižvaigždinis radijo šaltinis. Dabar patys galingiausi antžeminiai teleskopai ir Hablo kosminis teleskopas jau leidžia aptikti galaktikas arba bent jų pėdsakus aplink daugelį kvazarų.

Kvazarai yra patys galingiausi žinomi Mūsų Visatos spinduoliai. Jie spinduliuoja šimtus, tūkstančius ir net dešimtis tūkstančių kartų daugiau energijos už mūsų Galaktiką. Visais požymiais jie labai panašūs į Seiferto bei galingiausius radijo galaktikų branduolius, tik dešimtis, šimtus ar tūkstančius kartų galingesni. Panašios ir plačiosios bei siaurosios emisijos linijos. Manoma, kad analogiški ir ištisinio spektro bei plačiųjų emisijos linijų susidarymo mechanizmai.

Skiriamos dvi kvazarų rūšys – ***radijo kvazarai*** (panašūs į galingiausius radijo galaktikų branduolius) ir ***tylieji kvazarai*** (panašūs į Seiferto galaktikų branduolius). Ir Seiferto galaktikų branduoliai, ir tylieji kvazarai neišsiskiria nei galingomis čiurkšlėmis su plazmoidais, nei labai stipriu radijo spinduliavimu. Kaip tiktai šitai ir reiškia pavadinimas „tylieji“.

Radijo kvazarus iš šonų lydi du išoriniai radijo šaltiniai (kartais užregistruojamas tik vienas) – du milžiniški plazmoidai, čiurkšlėmis sujungti su centriniu šaltiniu. Plazmoidai ir čiurkšlės savo struktūra ir matmenimis labai panašūs į tokius pat radijo galaktikų išorinius šaltinius, tik apie dešimt kartų galingesni. Jų radijo šviesiai yra tarp 10^{35} W ir 10^{39} W. Čiurkšlės labai nesimetriškos. Pakankamai patikimai stebima tik viena čiurkšlė, o antrosios, kuri nukreipta įstrižai tolyn nuo mūsų ir labai sumenkusi dėl Doplerio reiškinio, aptinkami silpni pėdsakai. Decimetrines bei centimetrines radijo bangas gana stipriai spinduliuoja ir nelabai tolima branduolio aplinka – centrinė kvazarinės galaktikos dalis.

Dar negalima patikimai teigti, kuo tarpusavyje skiriasi radijo ir tyliuosius kvazarus gaubiančios galaktikos. Susidaro įspūdis, kad radijo kvazarai yra elipsinių galaktikų branduoliai, o tylieji – spiralinių. Išeitų, kad radijo kvazarai giminingi radijo galaktikoms, o tylieji – Seiferto galaktikoms. Jei ateityje tai pasitvirtins, iškils įdomus uždavinys paaiškinti, kodėl elipsinių galaktikų branduoliai geba išmesti nepaprastai galingas čiurkšles, iš kurių susidaro gigantiški reliatyvistinės ir nereliatyvistinės plazmos debesys, o spiralinių galaktikų branduoliai šito beveik nesugeba. Užtat stebima pastarųjų tendencija galingiau skleisti trumpesnes negu radijo elektromagnetines bangas.

Pavadinimas „kvazarai“ paplito po 1962 m., kai buvo įsitikinta, jog egzistuoja taškiniai (kampiniai matmenys mažesni už tuometinę aparatūros skiriamąją gebą) radijo šaltiniai, kurių koordinatės sutampa su silpnais žvaigždžių išvaizdos spinduoliais. Tačiau paaiškėjo, kad šios „žvaigždės“ yra labai savotiškos: kitoks skleidžiamos energijos pasiskirstymas pagal bangų ilgius,

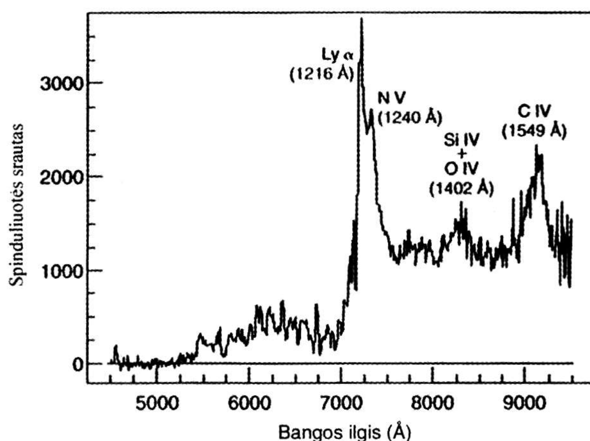
pavyzdžiui, per stipri artimoji ultravioletinė dalis, spektre nematyti sugerties linijų, o plačių emisijos linijų neįmanoma identifikuoti, nes jų bangų ilgiai nesutampa su jokių žinomų linijų bangų ilgiais.

Pagaliau 1963 m. olandų astronomas Martenas Šmitas (*M. Schmidt*), dirbęs Maunt Palomaro (JAV) observatorijoje, identifikavo vienos tokios „žvaigždės“ ($V = 12,^{m}7$), sutampančios su radijo šaltiniu 3C 273, emisijos linijas, padaręs prielaidą, kad jos neįprastai daug (aniems laikams) pasistūmusios į raudonąją pusę, būtent $z = 0{,}158$. Vadinasi, šis objektas nuo mūsų tolsta 43 700 km/s greičiu (žr. **8.15**) ir yra toli už Galaktikos ribų: remiantis Hablo dėsniu (**8.17**) gaunama, kad jo atstumas $r = 583$ Mpc. Jeigu taip, tai (**8.23**) formulė, atsižvelgus į tarpžvaigždinę ekstinkciją mūsų Galaktikoje, pateikia šitokį absoliutinį ryškį $M_V = -27{,}3$. Vadinasi, „kvazižvaigždinis radijo šaltinis“ 3C 273 geltonųjų ir oranžinių spindulių (V ryškio spektrinė sritis) skleidžia 500 kartų daugiau negu visa mūsų Galaktika.

M. Šmito pavyzdžiu sėkmingai pasekė kiti astronomai tirdami kvazarų spektrus ir nustatydami jų didžiulius raudonuosius poslinkius. Įsitikinta, kad kvazarai yra nepaprastai galingi spinduoliai.

Atradus radijo kvazarus, greitai buvo aptikti ir tylieji kvazarai. Iš pradžių jie buvo pavadinti kvazižvaigždinėmis galaktikomis arba sutrumpintai kvazagais ir nepriskirti prie kvazarų. Tačiau ilgainiui dauguma autorių juos irgi ėmė vadinti kvazarais. Taip ir atsirado dvi visiškai skirtingos kvazarų rūšys. Tyliųjų kvazarų randama apie dešimt kartų daugiau negu radijo kvazarų.

Net ir labai tolimų, gilioje praeityje matomų kvazarų emisijos linijos rodo, kad branduolį gaubiančiose dujose už helį sunkesnių elementų yra tiek pat ar beveik tiek pat kaip Saulėje. Vadinasi, ankstesniųjų kartų supernovos



8.34 pav. *Kvazaro PC 1247 + 3406 spektro dalis. Matome, kad tolimieji UV spinduliai dėl didžiulio raudonojo poslinkio yra virtę raudonaisiais ir infraraudonaisiais spinduliais.* $z = 4{,}897$, $v_r = 0{,}944c$. *Mus tik dabar pasiekianti šviesa buvo sukurta praėjus vos* $2 \cdot 10^9$ *m. nuo Visatos pradžios*

ir kitos masyvios žvaigždės jau yra spėjusios dujas praturtinti vidutiniais ir sunkiaisiais cheminiais elementais. Bent jau masyviosiose galaktikose, tokios ir yra kvazarinės galaktikos. Jose esama ir dulkelių, kurioms susidaryti reikia metalų ir įvairių kitų atomų. Tai irgi patvirtina išvadą apie labai ankstyvą žvaigždžių statybinės medžiagos cheminės sudėties pakitimą.

Maždaug 40% stebimų kvazarinių galaktikų yra glaudžioje kaimynystėje su kita galaktika ir su ja sąveikauja, iškraipo viena kitos struktūrą, iš vienos į kitą gali tekėti dujų srautai. Manoma, kad tokia sąveika nukreipia į galaktikos centrinę sritį daug gausesnį dujų kiekį ir tuo būdu padidina tikimybę ten atsirasti labai aktyviam branduoliui – kvazarui.

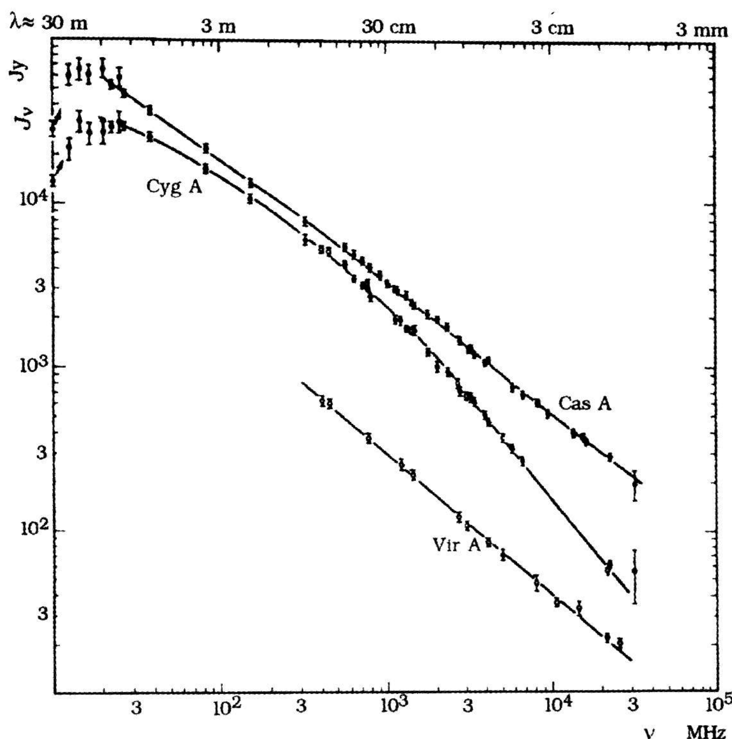
Atidžiau patyrinėjus, kvazarų spektruose randamos ir sugerties linijos. Vienos jų tikriausiai susidaro tuose pačiuose dujų debesyse, kuriuose atsiranda ir emisijos linijos. Tik emisijos linijos įsižiebia prie pat aktyvaus galaktikos branduolio, kol dar vyksta jonizuotų dujų masinė rekombinacija. O sugerties linijos išryškėja, kai tie patys debesys jau būna nulėkę toli nuo branduolio ir atsidūrę tarp branduolio ir mūsų. Aišku, kad šie debesys jau nebejonizuoti, neutralūs. Kitos sugerties linijos susidarė pakeliui tarp kvazaro ir mūsų skirtinguose nuotoliuose esančiuose dujų debesyse. Dauguma jų priklauso pakeliui esančioms galaktikoms. Vienos šių galaktikų jau aptiktos, o kitos tebėra neįžiūrimos. Dalis dujų debesų gali būti ir ištrūkę arba išmesti į tarpgalaktikinę erdvę. Sugerties linijos leidžia ištirti debesų cheminę sudėtį. Nerandama debesų, kuriuose visiškai nebūtų už helį sunkesnių elementų. Jų yra arba maždaug tiek kiek Saulėje, arba iki šimto kartų mažiau. Įvairių klasių galaktikų su aktyviais branduoliais spektrų pavyzdžių yra **8.26**, **8.31–8.34** pav.

8.4.3. Aktyviųjų galaktikų branduolių, čiurkšlių ir plazmoidų ištisinio spektro prigimtis ir kilmė

Visų šių objektų skleidžiamoms ištisinio spektro elektromagnetinėms bangoms būdingos dvi specifinės savybės.

Pirma. Jos yra daugiau ar mažiau **poliarizuotos**. Poliarizacijos mastas siekia kelis, o kai kuriais atvejais keliasdešimt procentų.

Antra. Jų energijos pasiskirstymo pagal bangų ilgius λ arba dažnius ν kreivės visiškai nepanašios į Planko kreivę ir yra vadinamojo **rodiklinio pobūdžio** (žr. **6.7.4.1**). Tai reiškia, kad tokiuose logaritminiuose grafikuose, kurių pavyzdžiai parodyti **8.35–8.37** paveiksluose, einant į didesnių dažnių pusę energijos kreivė beveik visą laiką žemėja, atskiruose spektro diapazonuose sudarydama arba apytikriai tą pačią vieną tiesę arba skirtingo aukščio ir polinkio tiesių atkarpas. Ir tik ilgabangis spektro pakraštys dažnai esti kitoks – energijos kreivė ten gali mažai priklausyti nuo ν arba net užsilenkti į priešingą pusę (žr. **8.35** pav.).



8.35 pav. *Didžiausio spindesio sinchrotroninės kilmės radijo šaltinių energijos kreivės. Kasiopėjos A šaltinis yra apie 1700 metus sprogusios supernovos likučių ūkas, Gulbės A ir Mergelės A šaltiniai yra radijo galaktikų plazmoidai. Į dešinę atidėtas megahercais išreikšto elektromagnetinių virpesių dažnio ν logaritmas, o į viršų – janskiais (Jy) išreikšto radijo spindesio spektrinio tankio J_ν logaritmas. Ilgųjų bangų srityje energijos kreivės užlinksta žemyn dėl reliatyvistinių elektronų sukurtos savosios sugerties, taip pat dėl nereliatyvistinių elektronų sugerties*

Labai skiriasi plazmoidų ir galaktikų branduolių energijos kreivės. Plazmoidų kreivės labai staigų savo kritimą, einant trumpųjų bangų link, pradeda kelių ar keliolikos metrų ilgio radijo bangų diapazone. Dėl to infraraudonųjų spindulių srityje jos jau būna nukritusios iki neišmatuojamai mažų energijos verčių. Nuo kelių ar keliasdešimties metrų, einant ilgųjų bangų link. daugelio plazmoidų kreivės užlinksta priešinga kryptimi – žemyn.

Branduolių energijos kreivių aukščiausia vieta paprastai yra pereinamoje srityje tarp radijo bangų ir IR spindulių (bangų ilgiai tarp kelių mm ir kelių dešimčių μm). Nuo čia trumpųjų bangų link energijos kreivės leidžiasi žemyn iš lėto, nusitęsdamos ne tik per regimųjų, ultravioletinių, Rentgeno, bet ir per minkštųjų gama spindulių sritis. Einant ilgųjų bangų link, branduolių energijos kreivės užsilenkia žemyn jau centimetrinėje ar net milimetrinėje radijo bangų srityje.

Atrodo, kad čiurkšlės savo ištisinio spektro pobūdžiu užima tarpinę padėtį tarp branduolių ir plazamoidų. Nelabai toli branduolio jos spinduliuoja panašiai kaip branduoliai, o baigdamos išplisti į plazmoidus – panašiai kaip plazmoidai.

Į plazmoidų spektrus panašus ir viso to tūrio, iš kurio sklinda žvaigždžių šviesa, nežvaigždinės kilmės ištisinis spektras.

Poliarizacijos duomenų ir energijos kreivių analizė rodo, kad didelė visų šių objektų ištisinio spektro fotonų dalis yra **sinchrotroninės** kilmės (žr. **6.7.4.1**). Kuo daugiau reliatyvistinių elektronų, kuo didesnė jų energija ir stipresnis magnetinis laukas, tuo didesnė sinchrotroninio spinduliavimo galia ir tuo toliau trumpųjų bangų link nusitęsia ištisinis spektras. Savo ruožtu tuomet tuo gausiau tie patys reliatyvistiniai, taip pat ir nereliatyvistiniai elektronai absorbuoja radijo bangas iš ilgabangės spektro dalies, vadinasi, tuo greičiau toks spektras baigiasi radijo bangų srityje einant ilgųjų bangų link.

Taigi branduolių ir plazmoidų energijos kreivių labai ryškų skirtumą iš esmės nulemia magnetinio lauko stiprio ir kosminių spindulių koncentracijos (dalelių skaičiaus vienetiniame tūryje) bei jų energijos skirtumai. Juk plazmoidų magnetiniai laukai paprastai esti gana silpni – vos 10^{-1}–10^{-4} A/m (10^{-3}–10^{-6} erstedų). Panašus magnetinis laukas yra ir visame aktyviosios galaktikos žvaigždiniame tūryje. Visiškai kas kita branduolyje ir jo aplinkoje. Čia magnetinis laukas, einant galaktikos centro link, stiprėja labai greitai. Kelių pc nuotolyje nuo centro jo stipris jau gali siekti kelis erstedus (Oe). O šimtųjų ar tūkstantųjų pc dalių nuotolyje nuo centro – gal net daugelį milijardų Oe. Čia ir kosminių spindulių koncentracija bei jų energija daug didesnė negu plazmoiduose ar visame žvaigždiniame galaktikos tūryje.

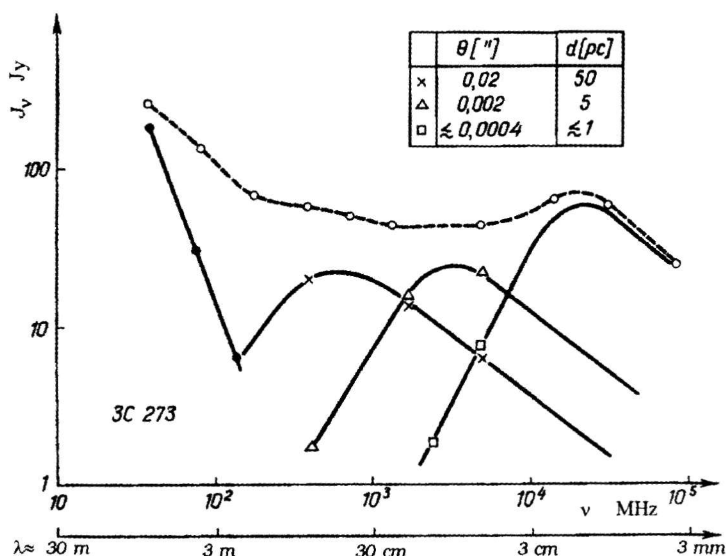
Formuojant aktyviųjų galaktikų branduolių ištisinį spektrą, sinchrotroniniam mechanizmui talkina daug kitų sudėtingų fizikos reiškinių, visų pirma **atvirkštinis Komptono reiškinys** (žr. **6.7.4.2**) ir labai karštos plazmos šiluminis spinduliavimas (daugiausia laisvieji šuoliai bei stabdomasis spinduliavimas). Dalį gama spindulių dar gali sukurti ir reliatyvistinių elektronų stabdomasis spinduliavimas, taip pat reliatyvistinių protonų susidūrimų su atomų branduoliais sukeltos branduolinės reakcijos.

Matome, kad visi čia išvardyti sinchrotroninio spinduliavimo talkininkai dar labiau paryškina branduolių ir plazmoidų ištisinio spektro skirtumus.

Branduolių spinduliuojamą ir šiaip nelabai stiprų radijo bangų srautą dar papildomai susilpnina tie patys juonizuotų dujų debesys, aprašyti **8.4.1.2** skirsnelyje, kurie storai gaubia branduolius ir kuriuose susidaro stiprios emisijos linijos. Dalį pralekiančių radijo bangų sugeria šiuose debesyse gausiai esantys laisvieji elektronai atlikinėdami laisvuosius šuolius. Kaip prisimename iš **6.2.2** skirsnio, juonizuotų debesų laisvieji elektronai patys yra šiluminės kilmės radijo bangų šaltiniai. Tačiau atsidūrę tarp stebėtojo ir dar stipresnio radijo šaltinio (aktyviosios galaktikos branduolio), jie tampa daugiau absorbuotojais negu spinduliuotojais.

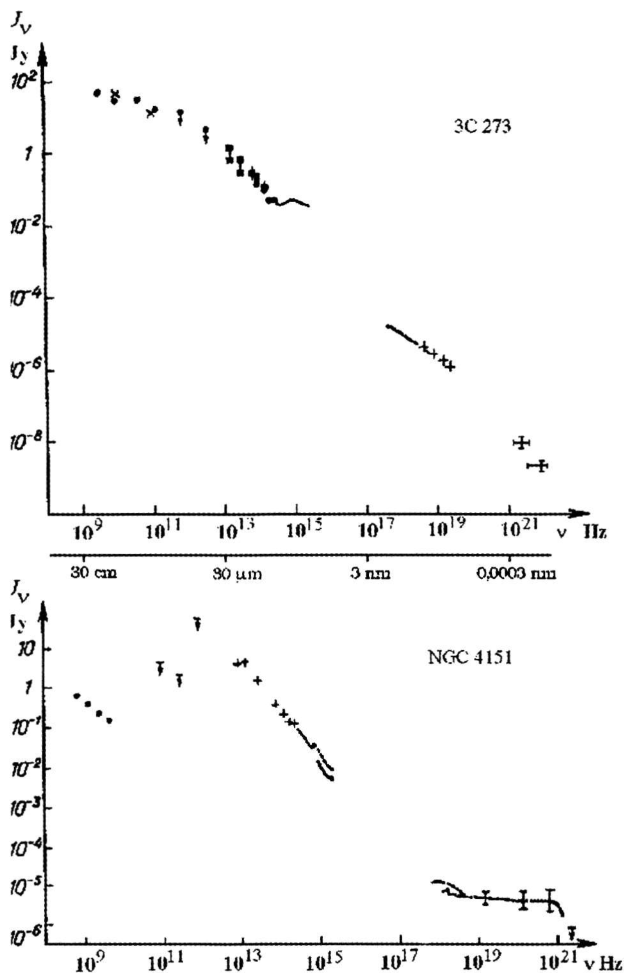
Dėl nepaprastai mažo tūrio beveik neįmanoma iš didelių nuotolių atskirai registruoti vien tik branduolių skleižiamas elektromagnetines bangas – būtinai į priėmimo aparatūrą kartu patenka ir artimesnėje ar tolimesnėje branduolio aplinkoje sukurti fotonai. Neretai tolimų kvazarų branduolio skleidžiamų elektromagnetinių bangų beveik negalima atskirti nuo viso žvaigždinio kvazarinės galaktikos tūrio ar net ir nuo plazmoidų spinduliuotės. Todėl gaunama tokia vidutinė energijos kreivė, kurios radijo sritį formuoja plazmoiduose ir žvaigždiniame galaktikos tūryje sinchrotroniniu būdu sukuriami fotonai, o regimųjų ir dar trumpesnių spindulių sritį – pačiame branduolyje ir jo visiškai artimoje aplinkoje įvairiais aukščiau aprašytais būdais sukuriami fotonai (žr. **8.36** pav). O štai infraraudonoji spektro sritis dar papildomai gauna daug šiluminės kilmės fotonų, kuriuos stipriai skleidžia aktyviosiose galaktikose, ypač spiralinėse, labai gausiai esančios dulkelės.

Pažvelgus į **8.37** pav. arba kitus panašius grafikus, iš pirmo žvilgsnio gali atrodyti, kad aktyviųjų galaktikų skleidžiamų nežvaigždinės kilmės ištisinio spek-



8.36 pav. *Radijo kvazaro 3C 273 energijos kreivės radijo bangų diapazone. Juodi taškai parodo radijo bangas, užregistruotas vien tik iš plazmoido. Tuščiaviduriai skrituliukai vaizduoja radijo bangas, priimtas iš žvaigždžių užpilyto kvazarinės galaktikos tūrio. Čia susimaišiusios ir centrinio branduolio, ir čiurkšlės, ir dalies plazmoido skleidžiamos radijo bangos. Taigi čia iš tikrųjų yra skirtingų energijos kreivių vidurkis. Panaudojus tarpžemyninę radijo interferenciją, labai padidėja priėmimo aparatūros skiriamoji geba. Pasiekus 0,″002 ar net 0,″0004 skiriamąją gebą, galima išskirti vos 5 pc ar 1 pc skersmens galaktikos centro aplinkos skleidžiamas radijo bangas. Šitokios energijos kreivės atitinkamai pažymėtos trikampiukais ir kvadratukais. Matome, kad arti galaktikos centro savoji sugertis, einant į ilgųjų bangų pusę, prasideda jau nuo 1 cm*

tro elektromagnetinių bangų energijos balanse pagrindinę dalį sudaro radijo bangos bei infraraudonieji spinduliai, o Rentgeno ir ypač gama spindulių energija visiškai menka. Juk energijos kreivė didelių dažnių srityje labai nukrinta žemyn. Tačiau toks įspūdis nėra teisingas. Lg J_ν priklausomybės nuo lgν grafikuose energijos kreivės aukštį nusako energijos kiekis, telpantis vienetiniame dažnių intervale tarp ν ir $\nu + 1$ Hz. Iš tikrųjų tas pats 1 Hz intervalas nėra vienodai talpus. Mažų ν srityje jis palyginti didelis, jame telpa daug energijos. Todėl ir lg J_ν kreivė yra aukštai. O didelių ν srityje jis palyginti mažas, jame telpa mažai energijos. Tačiau tokių 1 Hz intervaliukų tiek Rentgeno, tiek ir gama diapazonuose yra labai daug. Todėl ir juose telpančios energijos suma



8.37 pav. *Radijo kvazaro 3C 273 (viršuje) ir Seiferto galaktikos NGC 4154 nežvaigždinės kilmės ištisinio spektro energijos kreivės pradedant radijo bangomis ir baigiant gama spinduliais*

yra didelė. Tarp Seiferto galaktikų, kvazarų ir kai kurių radijo galaktikų skleidžiamų nežvaigždinės kilmės elektromagnetinių bangų savo energijos kiekiu pirmąją vietą dažnai užima infraraudonieji spinduliai. O dėl antrosios vietos bando varžytis ir Rentgeno, ir optiniai (300–800 nm), ir net gama spinduliai. Tiesa, daugumos radijo galaktikų nežvaigždinės kilmės energijos balanse dėl plazmoidų didumo pirmąją vietą dažniausiai užima vis dėlto radijo bangos.

8.4.4. Aktyviųjų galaktikų branduolių ir čiurkšlių prigimtis

Iškyla trys sudėtingi klausimai: 1) iš kokių išteklių ir kokiu būdu nedideliame kelių dešimčių pc ar net parseko dalių skersmens tūryje išsiskiria fantastiškai dideli energijos kiekiai, neretai nustelbiantys net visų galaktikos žvaigždžių energiją? 2) kaip, naudojant šią energiją, masiškai generuojami didžiulės energijos kosminiai spinduliai? 3) kaip susidaro milžiniškos čiurkšlės ir plazmoidai?

Panašu, kad visų šių nuostabių aktyvumo reiškinių pagrindinė pirminė priežastis yra didelių medžiagos kiekių kritimas (akrecija) į milžinišką kelių milijonų ar net kelių milijardų saulių masės juodąją bedugnę galaktikos centre. Tikėtina, kad veikia ir antroji, nors ir mažiau reikšminga priežastis – ypač gausi ir greita žvaigždėdara, tuo pačiu ir daug jaunų masyvių žvaigždžių bei nereti supernovų sprogimai aktyviųjų galaktikų centrinėse srityse.

Paskutiniajame XX a. dešimtmetyje, ypač paskutiniajame penkmetyje labai sustiprėjusi antžeminė astronominių stebėjimų technika ir Hablo kosminis teleskopas pateikė nemažai duomenų, kurie verčia manyti, kad daugelio (o gal ir visų?) galaktikų centruose slepiasi po gigantišką nežvaigždinės kilmės juodąją bedugnę. Būtent dvejose dešimtyse galaktikų (ne tik aktyviosiose, bet ir nerodančiose bent kiek žymesnių aktyvumo požymių, tarp pastarųjų ir mūsų bei Andromedos galaktikoje) pavyko išmatuoti netoli centro esančių kai kurių žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos debesų judėjimo greičius, ar net šių greičių priklausomybę nuo nuotolio iki galaktikos centro. Paaiškėjo, kad visais išmatuotais atvejais šie greičiai, siekiantys šimtus ir net per tūkstantį km/s, yra tokie dideli, jog minėtieji objektai turėtų nutolti nuo centro arba visai išlėkti iš savosios galaktikos. Centro aplinkoje juos gali sulaikyti tik labai kompaktiški didžiulės masės telkiniai. Galaktikų centruose aptinkamų žvaigždžių telkinių masės tam nepakanka. Todėl ir manoma, kad ten slypi po tokią juodąją bedugnę, kurios masė siekia milijonus ar net milijardus $M_{\odot}$. Mūsų Galaktikos centre esančios juodosios bedugnės masė siekia $2{,}5 \cdot 10^6\ M_{\odot}$.

Kuriami modeliai, kurie teigia, kad aktyvaus branduolio reiškiniai vyksta tada, kai į tokią juodąją bedugnę nuolatos dideliais kiekiais krinta dujos – vyksta akrecija. Jos greitis, pajėgiantis patenkinti energetikos poreikius, turėtų būti nuo kelių dešimtųjų $M_{\odot}$ iki kelių dešimčių, o gal ir šimtų $M_{\odot}$ per metus. Šitokią akreciją turėtų sąlygoti labai didelis padidinto tankio dujų ir dulkelių telkinys aplink juodąją bedugnę. Į jį turėtų susirinkti daug tarpžvaigždinės medžiagos iš visos galaktikos. Pradėti artėti prie galaktikos centro tarpžvaigždinė medžiaga (kaip ir žvaigždės) gali tik praradusi dalį savo judesio kiekio momento. Panašu, kad geriausios sąlygos labai dideliems tarpžvaigždinės medžiagos kiekiams patekti į artimą galaktikos centro aplinką susidaro galaktikoms susidūrus ar bent labai suartėjus. Todėl prie daugelio kvazarinių galaktikų aptinkamos visiškai glaudžios kaimynės, taigi ten vyksta galaktikų susidūrimo ar bent glaudaus suartėjimo procesas.

Artėjanti prie galaktikos centro tarpžvaigždinė medžiaga nebūna praradusi absoliučiai visą savo buvusį judesio kiekio momentą – tam tikra jo dalis išlieka. Dėl to ši medžiaga nekrinta tiesiai į juodąją bedugnę, o sudaro aplink ją labai greitai besisukantį didžiulį diską. Jis vadinamas ***akreciniu disku***. Dujų dalelių ir dulkelių tarpusavio smūgiai, elektrinė ir gravitacinė sąveika sukuria trinties jėgą, kuri dalį judesio kiekio momento perduoda disko išorei. Dėl to dujų ir dulkių dalelės, skriedamos akreciniame diske aplink juodąją bedugnę, pamažu spirale prie jos artėja. Tada mažėja šių dalelių gravitacinė energija – ji darosi vis neigiamesnė. Išsilaisvinusi gravitacinės energijos dalis virsta dalelių kinetine energija. O pastarosios dauguma, dalelėms daužantis tarpusavyje, virsta šilumine energija.

Akrecinio disko pakraščiuose, toli nuo juodosios bedugnės, kur jos gravitacinis laukas dar gana silpnas, šiluminės energijos išsiskiria nedaug, tarpžvaigždinė medžiaga ten lieka šalta ir tamsi. Žema medžiagos temperatūra ir padidintas medžiagos tankis skatina dulkelių susidarymą ir augimą. Todėl jų ten labai gausu.

Šiek tiek giliau, arčiau centro, dujų ir dulkių medžiagos tankis turėtų būti dar didesnis. O temperatūra pakilusi dar nedaug. Tokiose vietose turėtų klestėti itin intensyvi ir audringa žvaigždėdara.

Ir pagaliau dar daug giliau, dar arčiau juodosios bedugnės, jos gravitacinis laukas pasidaro gana stiprus ir ima labai greitai stiprėti prie jos artėjant. Spirale artėjančioje akrecinio disko medžiagoje gravitacinė energija pradeda mažėti, o jos vietoje šiluminė energija didėti labai dideliais ir greitai didėjančiais kiekiais. Dulkelės išgaruoja, dujos tampa jonizuotos. Pati vidinė akrecinio disko dalis įkaista iki daugelio milijonų laipsnių. Daug energijos akrecinio disko vidinė dalis, matyt, gauna ir iš pačios besisukančios apie savo ašį juodosios bedugnės. Teorinė fizika rodo, kaip šiuo atveju gali būti eikvojama juodosios bedugnės sukimosi energija.

Iš šių abiejų šaltinių gavusi labai daug energijos, akrecinio disko vidinė

dalis turi pasidaryti nepaprastai audringa. Labai stipriai įmagnetinto akrecinio disko ir besisukančios juodosio bedugnės sąveika ten privalo sukurti net 10^{20} voltų įtampos elektrinį lauką. Pasak modelio, ten teka milžiniškos, audringai besikaitaliojančios nestabilios elektros srovės, sklinda įvairiausių rūšių magnetohidrodinaminės bangos, taip pat ir smūginės bangos. O dėl to labai efektyviai greitėja elektringosios dalelės. Jas greitinti padeda ir plazmos tankio bei magnetinio lauko stiprio nevienodumai. Elektronai, protonai, helio ir sunkesnių atomų branduoliai masiškai pagreitėja iki reliatyvistinių ir ultrareliatyvistinių greičių. Tuo būdu akrecinio disko vidinė dalis ir jos aplinka generuoja tiek daug kosminių spindulių, kad jų energijos suma prilygsta ar net daug kartų pralenkia visų galaktikos žvaigždžių, ūkų bei kitų energijos šaltinių spinduliavimo ir kosminių spindulių generavimo energijos sumą. Akrecinių diskų aplink milžiniškos masės juodąsias bedugnes vidinės dalys turėtų būti rekordininkės stebimojoje Mūsų Visatos dalyje ne tik generuojamų kosminių spindulių gausumu, bet ir atskiroms dalelėms suteikiamos energijos kiekiu. Turėtų pasitaikyti dalelių, pagreitintų net iki 10^{25} eV ar dar daugiau. Kosminių spindulių srautą papildo ir iš juodosios bedugnės ergosferos ištrūkusios dalelės, reliatyvistinį greitį pasiekusios veikiant juodosios bedugnės gravitaciniam laukui ir jos sukimosi energijai (Penrouzo procesas).

Akrecinio disko vidinėje dalyje ir jos aplinkoje kolosalūs reliatyvistinių elektronų kiekiai, stabdomi ten veikiančio ypač stipraus magnetinio lauko, pajėgia masiškai gaminti sinchrotroninės kilmės fotonus ir tuo būdu sukurti **8.4.1.1** skirsnelyje aprašytąjį labai didelio tankio nežvaigždinės kilmės spindulių srautą – aktyvosios galaktikos branduolio spinduliuotę. Sinchrotroniniam spinduliavimo mechanizmui daug padeda atvirkštinis Komptono reiškinys ir kiti **8.4.3** skirsnyje paminėti spinduliavimo mechanizmai.

Taigi šis modelis teigia, kad **aktyvus galaktikos branduolys, taip pat ir kvazaras – tai 1) milžiniškos masės besisukanti juodoji bedugnė; 2) ją apgaubusio akrecinio disko labai karšta ir audringa vidinė dalis; 3) prie jos iš visų pusių prigludusi aplinka.**

Pro Hablo kosminį teleskopą kai kurių Seiferto ir radijo galaktikų centruose pavyko įžvelgti maždaug disko formos apytikriai 100–1000 pc skersmens tarpžvaigždinės medžiagos telkinius. Jų pačios vidinės dalys, esančios prie pat centro, nepaprastai greitai (kelių šimtų ar net per 1000 km/s greičiais) apie tą centrą sukasi. Matyt, tai ir yra akreciniai diskai aplink gigantiškąsias juodąsias bedugnes. Galbūt Hablo kosminis teleskopas užčiuopė tik pačius didžiausius akrecinius diskus. Daugelio aktyviųjų galaktikų centruose jie gal mažesni. Tačiau ir mažesnieji akreciniai diskai turėtų savimi apgaubti tūkstančius ar šimtus tūkstančių žvaigždžių. Juk visų, ne tik aktyvųjų galaktikų centrų aplinkoje žvaigždžių labai gausu, jos ten daug arčiau viena kitos negu, pavyzdžiui, Saulės aplinkoje. O aktyviųjų galaktikų akreciniuose diskuose jų turėtų būti dar daugiau – ten pilna naujagimių žvaigždžių.

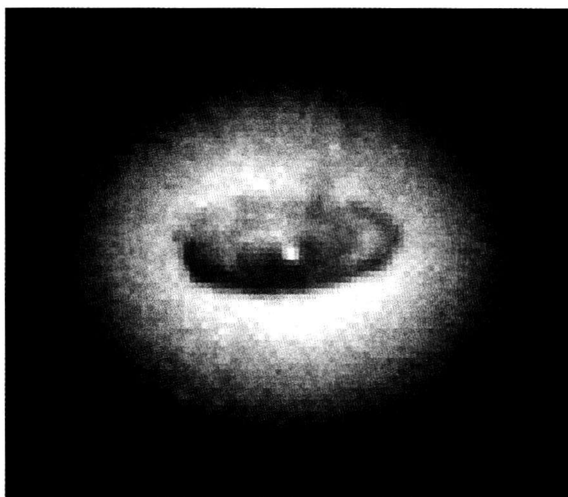


8.38 pav. *Hablo kosminiu teleskopu gautas radijo galaktikos NGC 4697, matomos Mergelės žvaigždyno kryptimi, centrinės dalies vaizdas. Matosi tamsiu ir šaltu, labai dulkėtu toru apjuostas 480 pc skersmens akrecinis diskas aplink* $1{,}2 \cdot 10^6\,M_\odot$ *juodąją bedugnę*

Manoma, kad šis ypatingas naujagimių žvaigždžių gausumas arti galaktikos centro sustiprina galaktikų aktyvumo reiškinius, papildo aktyvumo reiškinių energijos išteklius. Juk žvaigždės savo spinduliais, savo čiurkšlėmis, savo vėju, savo magnetiniu lauku labai suaudrina aplinkinę medžiagą (žr. **6.6.3**). Tuo labiausiai pasižymi naujagimės, ypač masyviosios. Kai kurios labai masyvios žvaigždės po keliolikos milijonų savo evoliucijos metų tampa antrojo tipo supernovomis, o retais atvejais net hipernovomis. Tokie sprogimai ne tik paskleidžia daug visokiausių elektromagnetinių bangų, bet ir dar labiau suaudrina plačią aplinką. **6.7.7** skirsnyje rašoma, kaip naujagimių žvaigždžių ir supernovų suaudrintoje aplinkoje masiškai greitinamos elektringosios dalelės, taigi generuojami kosminiai spinduliai (magnetinių laukų anihiliacija, elektriniai laukai, elektros srovės, magnetohidrodinaminės bangos, smūginės bangos, statistikinis Fermio mechanizmas). Tuo būdu greitos žvaigždėdaros sritys kartu yra ir galingi kosminių spindulių šaltiniai.

Akrecinio disko centrinė dalis, matyt, yra labai karšta, didelio tankio ir neskaidri. Taigi ten fizinės sąlygos primena sąlygas žvaigždžių gelmėse. Ten galėtų vykti ir vandenilio jungimosi į helį branduolinės reakcijos. Tai būtų dar vienas papildomas energijos šaltinis galaktikų aktyvumo reiškiniams.

Akrecinio disko storis ties jo vidine dalimi tikriausiai yra vos tūkstantosios pc dalys. Tačiau kuo toliau į pakraščius, tuo jis darosi daug storesnis. Jo išorinė dalis šalta ir tamsi, joje labai daug dulkelių. Galima sakyti, kad akrecinis diskas baigiasi storu, šaltu ir tamsiu ***toru*** (riestainio ar gelbėjimosi rato formos figūra), sudarytu iš dujų ir dulkelių mišinio.



8.39 pav. *200 pc skersmens akrecinis diskas aplink 10^9 $M_\odot$ juodąją bedugnę radijo galaktikos NGC 4261, priklausančios Mergelės spiečiui, centre. Hablo kosminiu teleskopu gautas vaizdas labai padidintas, todėl matosi panoraminių šviesos imtuvų CCD atskirų elementų kvadratėliai. Centrinis šviesus kvadratas, matyt, rodo patį galaktikos branduolį – didelio skaisčio švytėjimo sritį betarpiškoje juodosios bedugnės aplinkoje*

Jei akrecinio disko ir aplink jį apsirietusio toro sukimosi ašis yra beveik statmena krypčiai į stebėtoją, kitaip sakant, jei mes esame disko ir toro plokštumoje arba netoli nuo jos, tai toras mums gali užstoti dalį arba ir visą centrinį šaltinį, o jei jis pakankamai storas, tai ir tuos labai greitus debesis, kurių visuma skleidžia minėtas plačiąsias emisijos linijas. Vadinasi, tai, kokius aktyvumo požymius stebime, priklauso ne tik nuo aktyviosios galaktikos rūšies, jos individualių savybių, bet ir nuo jos akrecinio disko orientacijos mūsų atžvilgiu.

Greitas ir netaisyklingas aktyviųjų branduolių spinduliavimo galios kitimas aiškinamas akrecinio disko audringumu ir netolygiu laikui bėgant jo aprūpinimu dujomis.

Kai kuriais atvejais pastebėta, kad iš aktyvaus branduolio sklindantys Rentgeno spindulių ir radijo bangų srautai kinta priešingai – Rentgeno srauto netikėtus susilpnėjimus lydi radijo srauto pastiprėjimai. Kuriami modeliai, kurie aiškina, kad, didėjant akrecinio disko masei, jo vidinė dalis pasidaro nebestabili ir greitai sukrenta į juodąją bedugnę. Tai labai suaudrina likusią akrecinio disko dalį ir sustiprina čiurkšles. Daugelio milijonų laipsnių karščio vidinės akrecinio disko dalies dingimas susilpnina Rentgeno spindulių srautą, o čiurkšlių ir išorinės akrecinio disko dalies audringumo sustiprėjimas laikinai sustiprina radijo bangų srautą. Palaipsniui akrecinio disko masė vėl išauga, vėl susidaro labai karšta jo vidinė dalis. O dar vėliau pastaroji vėl pasiekia nestabilumo būseną ir vėl greitai įkrenta į juodąją bedugnę.

Būtina atsakyti į klausimą, kas ir kaip aprūpina aktyvųjį galaktikos bran-

duolį dujomis. Juk dujų reikia ne tik nuolatiniam kritimui į juodąją bedugnę, bet ir gausiems debesims, kuriuos šviesos slėgis nuolat stumia tolyn nuo branduolio, išmeta net į tarpgalaktinę erdvę.

Viena reikiamų dujų dalis turėtų nuolatos atslinkti iš visos galaktikos. Tai ir į žvaigždžių sudėtį dar nespėjusios patekti ir, priešingai, žvaigždžių vėjo bei supernovų sprogimų iš žvaigždžių jau išmestos dujos.

Tik reikia, kad jos labai sumažintų savo judesio kiekio momentą, jo dalį perduotų, pavyzdžiui, kitoms dujoms. Jau kalbėjome, kad geriausios sąlygos dideliems tarpžvaigždinės medžiagos kiekiams patekti arti galaktikos centro susidaro galaktikoms susidūrus ar bent labai suartėjus.

Kita reikiamų dujų dalis juodosios bedugnės aplinkoje, matyt, atsiranda atskiromis stambiomis porcijomis, kuomet kuri nors žvaigždė atsitiktinai per daug prisiartina prie juodosios bedugnės ir dėl to potvynio jėgų tiesiog sudraskoma, paverčiama dujų debesėliu.

Kai juodosios bedugnės masė M išauga iki kelių šimtų milijonų $M_{\odot}$, jos gravitacinis spindulys R_g (žr. (**5.111**) pasiekia maždaug 10^9 km vertę. Tokios didelės juodosios bedugnės aplinkoje potvynio jėgos žvaigždžių jau nebepajėgia sudraskyti. Pernelyg priartėjusi žvaigždė įkrinta į juodąją bedugnę jau sveika, nepalikusi dujų akreciniam diskui. Jei ir kiti dujų šaltiniai galaktikos centro aplinkoje išsenka, aktyvus galaktikos branduolys liaujasi egzistavęs, nes beveik išnyksta akrecinis diskas. Tokia galaktika nebeišsiskiria iš kitų, paprastų galaktikų.

Mūsų Galaktikos centras beveik nerodo aktyvumo požymių. Vadinasi, ten esanti juodoji bedugnė, praeityje išaugusi iki $2{,}5 \cdot 10^6\ M_{\odot}$, dabar „badauja" ir todėl „snaudžia" – jos artimoje aplinkoje mažoka tarpžvaigždinės medžiagos, ji neturi masyvaus akrecinio disko, kuris ją „maitintų" dujomis.

Erdvėlaiviai, stebintys dangų IR spinduliais, aptiko šimtus tolimų galaktikų, kurių nesimatė ar beveik nesimatė regimosios šviesos pagalba. Paaiškėjo, kad kai kurių jų infraraudonasis šviesis šimtus kartų didesnis už regimosios šviesos šviesį ir prilygsta Seiferto galaktikų ar net kvazarų infraraudonajam šviesiui. Yra žinomi trys pagrindiniai IR spindulių šaltiniai galaktikose: 1) gausios dulkelės, kurias sušildo sugerti O ir B žvaigždžių spinduliai, ypač ultravioletiniai, 2) masyvios, greitai evoliucionuojančios žvaigždės, jau suspėjusios tapti raudonosiomis milžinėmis ir supermilžinėmis ir 3) aktyviųjų galaktikų branduoliai. Ne tik pirmojo ir trečiojo, bet ir antrojo šaltinio sėkmingai veiklai reikia to paties – galaktikoje turi būti labai daug dujų ir dulkelių. Juk masyvios raudonosios milžinės nėra senos – jų gausu tik tuomet, jei vos prieš dešimtis milijonų metų vyko greita žvaigždėdara. O astronomai vis labiau įsitikina, kad labai greitai žvaigždėdarai ir aktyvumo reiškiniams atsirasti palankias sąlygas sukuria galaktikų susidūrimai. Gal minimosios IR galaktikos irgi yra paveiktos galaktikų susidūrimų. Kai kuriose iš jų jau aptikta labai greitos žvaigždėdaros ir aktyvumo požymių.



8.40 pav. *Akrecinio disko ir čiurkšlių įvairių modelių vienas variantas (spalvoto piešinio nespalvota nuotrauka)*

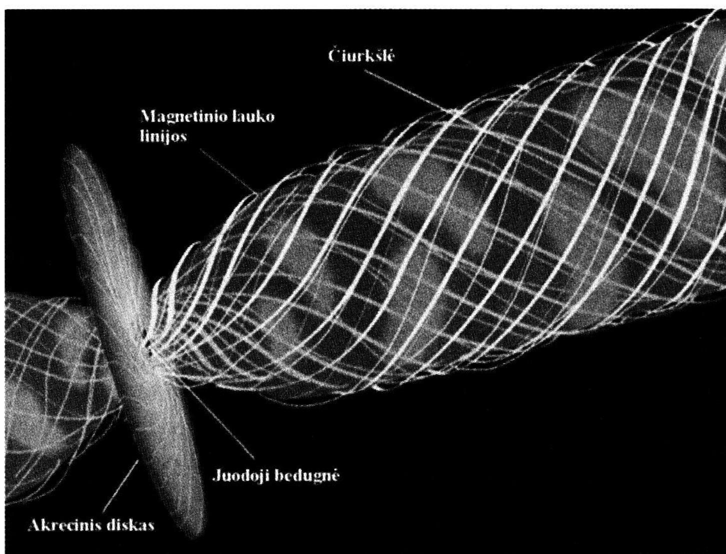
Čiurkšlių ir išorinių radijo šaltinių – **plazmoidų** – **susidarymas** irgi siejamas su akreciniu disku. Besisukančios juodosios bedugnės sūkurinis gravitacinis laukas būtinai priverčia akrecinį diską orientuotis taip, kad jo simetrijos plokštuma būtų statmena juodosios bedugnės ašiai. Diskas ima suktis, lyg būtų ant šios ašies užmautas. Disko dalelės privalo skrieti į tą pačią pusę, į kurią sukosi ir juodoji bedugnė. Didžiuliu greičiu skriedamos apie juodąją bedugnę, akrecinio disko dalelės pradžioje prie jos artėja iš lėto. Tačiau kai tokios dalelės orbitos spindulys sumažėja iki $3R_g$, skriejimo išcentrinė jėga nebepajėgia priešintis gravitaciniam laukui, dalelė keičia savo judėjimo kryptį ir daug staigesne spirale negu iki šiolei, su milžinišku pagreičiu krinta į ergosferą. Dėl to akrecinio disko viduryje susidaro kiaurymė, nukreipta išilgai disko sukimosi ašies, kuri sutampa su juodosios bedugnės sukimosi ašimi. Jei akrecinis diskas yra pakankamai storas, kiaurymė susidaro gana ilga. Jos sienos – tai pati karščiausia, didžiausio tankio neskaidri akrecinio disko centrinė dalis. Tokios karštos sienos nepaprastai stipriai spinduliuoja, ypač Rentgeno ir ultravioletinius spindulius. Šie spinduliai labai intesyviai užpildo kiaurymės vidų, lekia išilgai kiaurymės į dvi priešingas puses tolyn nuo juodosios bedugnės. Taip susidaro du nepaprastai galingi, labai didelio tankio spinduliuotės srautai, lekiantys į priešingas puses išilgai juodosios bedugnės

ir disko sukimosi ašies. Srautuose gausiai dalyvauja ir plazmos dalelės. Tiek fotonams, tiek ir plazmos dalelėms lėkti kitomis kryptimis sutrukdo arba juodoji bedugnė, arba kiaurymės sienos. Plazmos srautus „maitina“ akrecinis diskas ir ergosferoje papildomai pagreitintos, o paskui iš jos ištrūkusios dalelės. Visos abiejų plazmos srautų dalelės yra arba reliatyvistinės arba beveik reliatyvistinės – jų greičiai turėtų būti ne mažesni kaip kelios dešimtys ar visas šimtas tūkstančių km/s. Lėčiau judančių dalelių arti juodosios bedugnės tiesiog negali būti – tučtuojau į ją įkristų.

Plazmos srautai turi ir savo magnetinį lauką. Be to, srautus veikia audringo akrecinio disko magnetiniai ir elektriniai laukai, elektros srovės, magnetohidrodinaminės bangos. Visa tai turėtų sukurti sudėtingą elektros srovių tinklą, kuris indukuotų ne mažiau sudėtingos konfigūracijos papildomą magnetinį lauką. Šis papildomas magnetinis laukas galėtų turėti ir tokios konfigūracijos komponentą, kuris labai suplonina plazmos srautus ir tuo būdu baigia akrecinio disko kiaurymės pradėtą darbą – galutinai suformuoja dvi plonas, labai mažai prasiskleidžiančiu kūgiu trykštančias plazmos dalelių ir fotonų mišinio čiurkšles, pajėgias išsiveržti toli į tarpgalaktinę erdvę. Pavyzdžiui, sujungus į vieningą tinklą beveik 30–ties radijo teleskopų antenas, esančias JAV ir Europoje, ir naudojant interferenciją pasiekus 0″,0005 skiriamąją gebą, pavyko nustatyti, kad radijo galaktikos M 87 (žr. **8.12** ir **8.28** pav.) čiurkšlė 0,04 pc nuotolyje nuo galaktikos centro prasiskleidžia 60° kampu, o 3 pc nuotolyje šis kampas jau yra sumažėjęs iki 6°. Čiurkšlė su savimi nusitempia ir dalį pakeliui užkluptų dujų, kurios trukdo čiurkšlei lėkti, sumažina plazmos greitį, prisideda prie čiurkšlės išplitimo, virtimo didžiuliu įmagnetintos plazmos debesimi – plazmoidu.

Čiurkšlių plazmos daleles arti akrecinio disko, ypač dar pačioje jo kiaurymėje turėtų labai greitinti kartu su plazma išilgai čiurkšlės besiveržiantis elektromagnetinių bangų srautas. Daleles taip pat greitina ir elektriniai laukai bei kai kurių rūšių bangos. Savo ruožtu pagreitinti iki reliatyvistinių ir ultrareliatyvistinių greičių elektronai atvirkštinio Komptono reiškinio metu dalį savo energijos perduoda fotonams ir tuo būdu juos paverčia gama spindulių fotonais. Du tokie fotonai, sąveikaudami tarpusavyje, gali virsti elektrono ir pozitrono pora. Pastarieji vėl greitinami, jiems suteikta energija atvirkštinio Komptono reiškinio metu vėl atitenka naujiems gama fotonams, o iš jų vėl atsiranda elektronų bei pozitronų poros ir t. t. Elektronai ir pozitronai taip pat kontaktuoja ir anihiliuoja irgi virsdami gama fotonais. Taigi radijo galaktikų ir radijo kvazarų čiurkšlės galbūt yra plazmos (daugiausia reliatyvistinės bei ultrareliatyvistinės) ir fotonų (daugiausia trumpabangių) mišinys, kuriame tam tikras fotonų ir dalelių procentas nuolat tampa vieni kitais.

Teoriniams čiurkšlių modeliams labai sunkus egzaminas yra reikalavimas paaiškinti, kokiu būdu dalis išilgai čiurkšlės transportuojamos energijos visur



8.41 pav. *Magnetinio lauko poveikis mažinant čiurkšlių prasiskleidimo kampą (HST instituto modelis)*

pakeliui nuolat virsta sinchrotroninės kilmės spindulių energija, plintančia jau nebe išilgai čiurkšlės, o kitomis kryptimis. Sinchrotroninio spinduliavimo metu reliatyvistiniai elektronai greitai praranda savo didžiulę energiją, tampa nebe reliatyvistiniais. Pavyzdžiui, regimąją šviesą sinchrotroniniu būdu skleidžiantys elektronai tokiam savo spinduliavimui pritrūksta energijos jau per dešimtis metų, radijo bangas skleidžinatys elektronai – per dešimtis tūkstančių ar milijonus metų. Čiurkšlės egzistuoja daug ilgiau. Vadinasi, išspinduliavę savo didžiulę kinetinę energiją, elektronai kaskart iš naujo greitinami (arba jų vietoje greitinami vis kiti elektronai). Taip yra ir išilgai visą čiurkšlę ir jos pabaigoje – didžiuliame plazmoide.

Pagal kai kuriuos čiurkšlių modelius elektronų (turbūt ir protonų bei sunkesnių branduolių) greitinimui palankios sąlygos susiklosto tada, kai magnetinį lauką turinti čiurkšlės plazma didžiuliu greičiu smogia į pakeliui užtiktas dujas. Tokia sąveika turi sukelti smūgines bangas ir stiprų turbulentinį judėjimą. Dėl to atsiranda elektros srovės ir magnetohidrodinaminės bangos. Elektringąsias daleles gali greitinti ir elektriniai laukai, ir elektros srovės, ir kai kurios magnetohidrodinaminės bangos, ir smūginių bangų frontai, ir susidūrimai su skirtingai judančiais atskirais įmagnetintos plazmos sutankėjimais. Taigi greitinimo mechanizmai galėtų būti maždaug tokie pat kaip ir supernovų sprogimų išmestose dujose. Tačiau reikia, kad čiurkšlė visur pakeliui turėtų į ką smogti – visur užtiktų dujas. Kol čiurkšlė dar veržiasi per savosios galaktikos tūrį, aišku, pakeliui užklumpa daug visokių dujų – ir susirinkusių į debesis, ir užpildančių tarpus tarp debesų. Tarpgalaktinėje erdvėje galakti-

kų spiečių viduje dujų irgi yra, nors jų tankis čia daug mažesnis. O galaktikų spiečių išorėje dujų turėtų būti mažoka.

Todėl bandoma sugalvoti ir kitokių galimų elektringų dalelių greitinimo čiurkšlėse ir plazmoiduose būdų. Čiurkšles tyrinėjančių astrofizikų dar laukia labai didelis darbas.

Yra nemažai radijo galaktikų, kurių abi čiurkšlės nėra tiksliai nukreiptos į priešingas puses – tarp jų kampas mažesnis už 180°. Tai, pavyzdžiui, galima matyti ir **8.30** pav. Kai kuriais atvejais šis kampas mažesnis ir už 90°. Manoma, kad čiurkšles atgal atlenkia tarpgalaktinės dujos, kuomet radijo galaktika jas dideliu greičiu skrodžia judėdama savojo galaktikų spiečiaus viduje.

8.4.5. Blazarai, arba lacertidės

Tai iš pirmo žvilgsnio labai panašūs į kvazarus objektai – vos įžiūrimos galaktikos su labai stipriai švytinčiais žvaigždės pavidalo branduoliais. Tačiau jų spektruose nėra tokių stiprių ir plačių emisijos linijų kaip kvazarų, Seiferto galaktikų ir kai kurių radijo galaktikų spektruose. Labai atidžiai tyrinėjant, randamos visiškai silpnutės sugerties, o kai kada ir emisijos linijos, kurios susidaro ne branduolio aplinkoje, o visame aplink branduolį esančios galaktikos tūryje. Tai žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos debesų spektrų linijos. Branduolio spektras yra ištisinis, suformuotas daugiausia sinchrotroninio spinduliavimo ir atvirkštinio Komptono reiškinio. Visos šio spektro elektromagnetinės bangos – ir radijo, ir IR, ir optiniame diapazone – yra smarkiai poliarizuotos. Netaisyklingas spinduliavimo galios kitimas, siekiantis net 6–7 ryškius (300–600 kartų), užtrunka vos mėnesius, savaites ar dienas.

Manoma, kad blazaro reiškinį stebime tada, kai viena radijo galaktikos čiurkšlė reliatyvistiniu greičiu lekia ne įstrižai mūsų link, o beveik tiesiai į mus. Dėl milžiniško Doplerio reiškinio mes tokios čiurkšlės viršūnės fotonus priimame daug kartų sustiprintus, perstumtus toli į trumpabangę pusę. Šie labai sustiprinti čiurkšlės fotonai susimaišo su nesustiprintais akrecinio disko bei jo aplinkos fotonais. Spektro linijos tampa užmaskuotos. Visa tai ir sudaro labai stipriai spinduliuojantį blazaro branduolį. O tolyn nuo mūsų lekianti antroji čiurkšlė lieka tiek Doplerio reiškinio susilpninta, kad jos visiškai neaptinkame.

Doplerio reiškinys daugiau ar mažiau suardo čiurkšlių simetriją ir kitais atvejais, kai čiurkšlė lekia ne tiesiog į mus, o įstrižai. Tai ypač ryšku tarp kvazarų. Juk jų antrosios, nuo mūsų įstrižai tolyn trykštančios čiurkšlės beveik neįmanoma aptikti.

Blazarai turi ir kitą pavadinimą – ***lacertidės***. Mat kai kurie blazarai anksčiau, iki kvazarų atradimo, buvo laikomi mūsų Galaktikos savotiškomis kintamosiomis žvaigždėmis. Būdingiausia jų atstovė, matoma Driežo žvaigždyne,

pagal įsigalėjusią kintamųjų žvaigždžių žymėjimo tradiciją buvo žymima „BL Lacertae“ (lotyniškai *lacerta* – driežas). Įsitikinus, kad tai ne žvaigždės, o galingos ir aktyvios galaktikos, „BL Lac“ žymėjimo raidės buvo panaudotos sukurti išgalvotam žodžiui, primenančiam panašumą į kvazarus. Taip ir atsirado dirbtinis pavadinimas „***blazaras***“.

8.4.6. Tariamai greičiau už šviesą judančios čiurkšlių detalės

Kai kurių kvazarų ir radijo galaktikų atveju pastebėta, kaip čiurkšlės viršūnė arba kokia nors kita čiurkšlės detalė, pavyzdžiui, atskiri skaisčiau švytintys mazgai dangaus sferoje (labai stambaus mastelio žvaigždėlapyje) palaipsniui plečiasi arba keičia savo padėtį branduolio ar viena kitos atžvilgiu. Per dešimtmetį tokie poslinkiai kartais siekia tūkstantąsias ar šimtąsias kampinės sekundės dalis. Tarus, kad judančioji čiurkšlės detalė praktiškai yra tame pačiame nuotolyje kaip pats kvazaras, jos judėjimo greitis neretai gaunamas net iki 50 kartų didesnis už šviesos greitį.

Šis paradoksas buvo išaiškintas 1978 m. remiantis prielaida, kad čiurkšlė yra reliatyvistinė, tai yra trykšta beveik šviesos greičiu, o jos veržimosi kryptis su kryptimi į stebėtoją sudaro pakankamai mažą kampą. Šiuo atveju kuri nors čiurkšlės detalė, mūsų link pasiuntusi elektromagnetinių bangų signalą, pati artėja prie mūsų, mažai atsilikdama nuo savojo signalo. Dėl to atskirus signalus mes priimame daug mažesniais tarpais, negu jie buvo pasiųsti. Tarkime, kad antrąjį signalą tiriamoji detalė mums pasiuntė praėjus šimtui metų nuo pirmojo signalo pasiuntimo. Per tą laiką ji prie mūsų priartėjo, pavyzdžiui, per 97 šm. Vadinasi, antrąjį signalą mes priimsime praėjus vos trejiems metams nuo pirmojo signalo priėmimo. Per tą patį 100 metų tiriamoji detalė, lėkdama ne tiesiog į mus, o įstrižai, pasislinko į šoną, pavyzdžiui, per 10 šm. O mums atrodo, kad šiuos 10 šm į šoną ji nulėkė vos per trejus metus! Taigi šviesos greitis viršijamas tik tariamai.

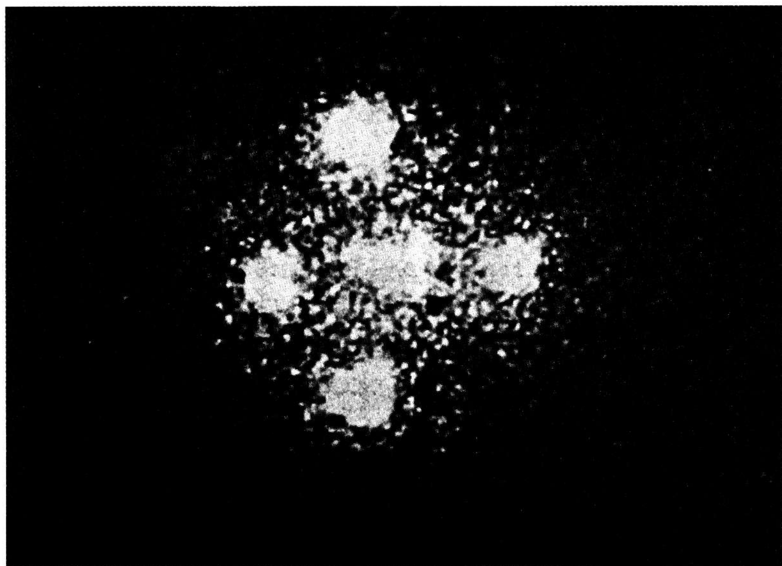
Yra ir šiek tiek kitokių, sudėtingesnių situacijų, kuomet mums atrodo, kad stebime greičiau už šviesą judančią medžiagą, nors iš tikrųjų taip nėra. Visais atvejais čiurkšlė turi būti reliatyvistinė ir veržtis beveik mūsų link.

Išnagrinėkime vieną tokį pavyzdį. Prisiminkime, kad sinchrotroninis spinduliavimas tuo galingesnis, kuo stipresnis magnetinis laukas. Įsivaizduokime kokią nors čiurkšlės detalę, kurią tam tikrą laiką gaubia labai silpnas magnetinis laukas arba jo ir iš viso nėra. O paskui ši detalė patenka į sritį su pakankamai stipriu magnetiniu lauku. Jos skaistis staiga padidėja. Jei magnetinio lauko linijos nėra statmenos tiriamosios detalės judėjimo krypčiai, į šį lauką detalė patenka ne visu savo priekiniu frontu iš karto, o palaipsniui,

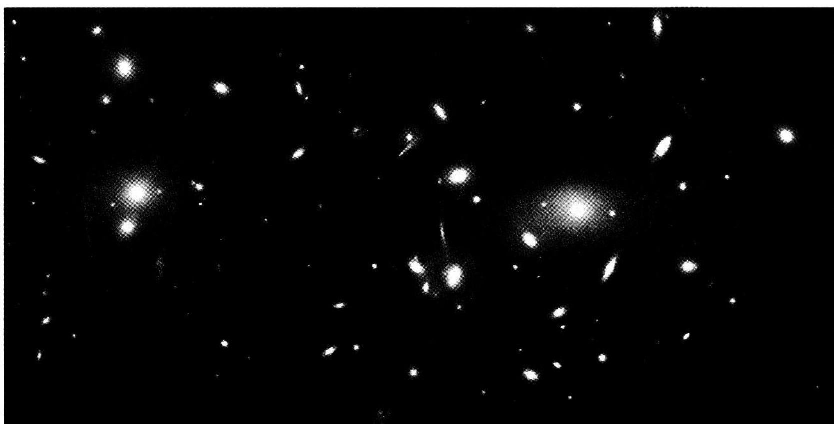
pavyzdžiui, nuo kažkurio savo priekinio fronto pakraščio. Todėl galima stebėti, kaip plečiasi didesnio skaisčio dėmelė. Jei čiurkšlė trykšta beveik į mus, o stipresnio magnetinio lauko srities riba gana griežta ir beveik statmena čiurkšlės veržimosi krypčiai, didesnio skaisčio dėmelės plėtimosi greitis bus didesnis už šviesos greitį. Bet čia ne medžiagos, o tik regimasis signalo judėjimo greitis.

8.5. GRAVITACINIAI LĘŠIAI

Daugelio labai tolimų didelio šviesio galaktikų, ypač kvazarų, šviesa pakeliui į mus turi pralėkti per kitas galaktikas. Kai kuriais atvejais tokios galaktikos mes net neįžiūrime, ir ji nesutrukdo pamatyti tiksliai už jos atsidūrusį tolimąjį galingą spinduolį. O jei tolimojo kvazaro šviesa pakeliui pralekia visiškai greta kompaktiškos galaktikos (kompaktiškumo matas yra masės ir spindulio santykis M/R), tai labai stiprus tos galaktikos gravitacinis laukas pralekiančius spindulius truputį užlenkia. Dėl to pasitaiko atvejų, kai mus pasiekia ir tiesioginiai tolimojo kvazaro spinduliai, ir tie jo spinduliai, kurie turėjo į mus nepataikyti, tačiau pataikė, nes truputį užlinko pakeliui ties nematoma (o kartais ir matoma) galaktika. Tuomet dangaus sferoje labai arti vienas kito (kelių kampinių sekundžių nuotolyje) užfiksuojame du to paties kvazaro beveik vienodus vaizdus. Pasitaiko ir sudėtingesnių atvejų, kada aptinkami visiškai arti vienas kito trys, keturi, penki ar net šeši to paties kvazaro



8.42 pav. *Einšteino kryžius – gravitacinio lęšio pavyzdys. Matyti to paties kvazaro G227+0305, esančio už 2,5 milijardų pc, keturi vaizdai aplink 20 kartų arčiau esančios galaktikos – gravitacinio lęšio vaizdą*



8.43 pav. *Galaktikų spiečiaus Abell 2218, matomo Slibino žvaigždyno kryptimi, centrinė dalis. Iki jo milijardas pc. Šioje Hablo kosminiu teleskopu gautoje elektroninėje nuotraukoje aiškiai matome, kad šis spiečius, kaip ir kiti kompaktiški galaktikų spiečiai, yra gravitacinis lęšis, 5–10 kartų toliau už spiečių esančių labai galingų galaktikų ir kvazarų vaizdus paverčiantis lankų pavidalo miražais*

vaizdai. Visi vieno kvazaro vaizdai turi tą pačią raudonojo poslinkio vertę *z*. Kartais atskiri vaizdai gali būti susilieję į žiedą ar atskirus jo gabalus.

Tokie reiškiniai vadinami ***gravitacinio lęšio reiškiniais***, o kūnas, savo trauka užlenkęs pralekiančius spindulius – ***gravitaciniu lęšiu***. Toks lęšis gali būti ne tik atskira galaktika, bet ir kompaktiškas galaktikų spiečius (žr. **8.42**, **8.43** ir **8.46** pav.).

8.6. GALAKTIKŲ GRUPĖS, SPIEČIAI, SUPERSPIEČIAI

8.6.1. Vietinė, arba Lokalinė, galaktikų grupė

Tai maždaug 40 galaktikų ir galaktikėlių – galbūt stambesnių galaktikų atplaišų – grupė (žr. **22** lentelę knygos pabaigoje), susidedanti iš palyginti netoliese viena kitos esančių dviejų supermilžiniškų spiralinių galaktikų, kiekviena su savo gausiais palydovais, ir aplink šiuos abu galaktikų archipelagus atokiau padrikai pabirusių maždaug 10 vidutinių ir menkučių galaktikų. Viena iš šių supermilžinių yra Paukščių Tako Galaktika, o antroji – Didysis Andromedos ūkas, dar žymimas M 31, arba NGC 224. Nuotolis tarp abiejų šių centrinių Vietinės grupės galaktikų sudaro 0,7 Mpc.

Stambiausia mūsų palydovė yra Didysis Magelano Debesis (žr. **8.14** pav). Ji priskirtina prie galaktikų – milžinių. Tai viena stambiausių netaisyklingųjų galaktikų. Ji nėra visiškai netaisyklinga, nes turi skersę ir šiokias tokias spira-

linių vijų užuomazgas. Todėl ji dar priskiriama ir prie spiralinių skersėtųjų SB galaktikų. Antroji pagal stambumą mūsų palydovė yra Mažasis Magelano Debesis. Tai vidutinė galaktika. Visos kitos Paukščio Tako Galaktikos palydovės yra nykštukinės sferoidinės galaktikos.

Didžiojo Andromedos ūko archipelage, be M 31, yra ir kita stambi spiralinė galaktika, žymima M 33, arba NGC 598, ir matoma Trikampio žvaigždyne. Ji išsidriekusi pačiame šio archipelago pakraštyje per 170 kpc nuo centrinės galaktikos M 31. Nuo mūsų ji ne už 680 kpc, kaip M 31, o už 720 kpc. Dvi vidutinės elipsinės galaktikos (NGC 185 ir NGC 147) matomos priešingame šio palydovių būrio pakraštyje Kasiopėjos žvaigždyne. Dar dvi vidutinės elipsinės galaktikos yra visiškai prie pat M 31 (žr. **8.6** pav.). Tai M 32, arba NGC 221, ir NGC 205. Įdomu, kad galaktikos M 32 pakraščiai gana griežti, ne tokie palaipsniui išblunkantys ir migloti kaip kitų elipsinių galaktikų. Matyt, ši galaktika yra „apnuoginta“ – mažo tankio jos periferinės sritys nuplėštos labai stipraus centrinės galaktikos M 31 gravitacinio lauko. Likusios Didžiojo Andromedos ūko palydovės yra nykštukinės sferoidinės arba netaisyklingosios galaktikos.

Vietinės grupės pakraščiuose aptiktos galaktikos priskiriamos netaisyklingųjų galaktikų klasei. Vietinės grupės skersmuo siekia beveik 3 Mpc. Vietinė grupė (tikriausiai ir kitos panašios grupės) yra labai paplokščios formos.

8.6.2. Kaimyninės galaktikų grupės

Su Vietine grupe beveik liečiasi kita panaši, tik mažesnė galaktikų grupė, matoma Skulptoriaus žvaigždyno kryptimi. Ji ir vadinama Skulptoriaus grupe. Joje rastos šešios Sc galaktikos ir apie dešimt Ir galaktikų. Šios grupės artimiausias pakraštys yra už 1,4 Mpc, o tolimiausias – už 2,5 Mpc nuo Saulės. Tokiame nuotolyje pačių menkiausių sferoidinių galaktikėlių, kokios surašytos **22** lentelėje, jau nebeįmanoma aptikti.

Iš viso rastos penkios panašios galaktikų grupės, esančios arčiau negu už 5 Mpc nuo mūsų, ir dar dvidešimt tolimesnių grupių. Už kelių dešimčių Mpc galaktikų grupių jau nebegalima aptikti, nes jų vietoje matosi tik patys stambiausi grupės nariai. Pavyzdžiui, vietoje Vietinės grupės matytųsi tik M 31, Paukščių Tako Galaktika ir M 33. Su stambesniu teleskopu visiškai šalia mūsų Galaktikos dar būtų galima užregistruoti ir Didįjį Magelano Debesį, o gal ir Mažąjį Magelano Debesį. Prie pat M 31 galaktikos galbūt dar matytųsi labai glaudžios jos palydovės M 32 ir NGC 205. Taigi nelabai toli viena kitos matytume dvi trinares galaktikas.

Iš tikrųjų rasta daug galaktikų, susibūrusių į glaudžias poras ar trejetus. Jos taip ir vadinamos – ***dvinarės*** ar ***trinarės galaktikos***. Greičiausiai jų aplinkose

esama ir daugiau galaktikų, kol kas dar neaptiktų dėl didelių nuotolių nuo mūsų. Matyt, dvinarės ar trinarės (retkarčiais pasitaiko ir keturnarių, penkianarių) galaktikos rodo, kad ten irgi yra galaktikų grupių, daugiau ar mažiau panašių į Vietinę grupę. Dalis glaudžių dvinarių ir daugianarių galaktikų priskirtinos sąveikaujančių galaktikų kategorijai (žr. **8.2.2.**).

8.6.3. Galaktikų spiečiai

Tai daug masyvesnės ir šiek tiek didesnio skersmens galaktikų sistemos negu galaktikų grupės. Daugumą galaktikų spiečių labai apytiksliai galima suskirstyti į dvi klases – ***kamuolinius*** **ir** ***padrikuosius spiečius***.

Kamuoliniai galaktikų spiečiai yra maždaug rutulio ar elipsoido formos, 3–10 Mpc skersmens, labai didelio tankio galaktikų sambūriai, kuriuose esti dešimtys tūkstančių galaktikų, ne mažesnio šviesio, kaip Mažasis Magelano Debesis arba Didžiojo Andromedos ūko palydovė M 32. Silpnesnių galaktikų, matyt, ten yra dar daugiau, tačiau jos lieka neprieinamos mūsų stebėjimams. Daugumą jų sudaro elipsinės ir lęšinės galaktikos. Spiralinių galaktikų daug mažiau.

Padrikieji galaktikų spiečiai yra beveik tokio pat didumo kaip ir kamuoliniai. Tačiau galaktikų juose dešimtis ar šimtus kartų mažiau. Taigi ten daug mažesnis galaktikų tankis, ne toks ryškus sutankėjimas einant prie spiečiaus centro. Padrikųjų spiečių forma mažiau taisyklinga negu kamuolinių. Padrikuosiuose spiečiuose spiralinių galaktikų yra maždaug dvigubai daugiau negu elipsinių ir lęšinių. Taip pat labai daug ir netaisyklingųjų galaktikų. Tačiau pačios masyviausios ir šviesiausios tiek padrikųjų, tiek ir kamuolinių spiečių galaktikos yra elipsinės ir lęšinės.

Artimiausias galaktikų spiečius yra už 20 Mpc. Jis matomas Mergelės žvaigždyno kryptimi ir todėl vadinamas Mergelės spiečiumi. Tai 5 Mpc skersmens padrikasis spiečius. Jo centre tūno milžiniška cD tipo elipsinė galaktika, žymima M 87, arba NGC 4486. Ji yra viena artimiausiųjų radijo galaktikų – radijo šaltinis „Mergelės A" (žr. **8.12** ir **8.28** pav.). Manoma, kad ši galaktika, kaip ir kai kurių kitų spiečių centruose matomos cD galaktikos, yra „kanibalė", „praryjanti" pernelyg prisiartinusias kitas spiečiaus galaktikas. Stambiausia Mergelės spiečiaus spiralinė Sa poklasio galaktika, žymima M 104, arba NGC 4594, dėl savo panašumo į meksikietiškąją skrybėlę yra pavadinta Sombreru (žr. **8.5** pav.).

Galaktikų spiečiai, ypač jų centrinės sritys, yra Rentgeno spindulių šaltiniai, kurių galia siekia 10^{35}–10^{39} W. Iš jų sklinda ištisinio spektro ir atskirų emisijos linijų Rentgeno spinduliai.

Ištisinio spektro energijos maksimumas yra 5–10 keV srityje. Tai karštos plazmos **stabdomasis spinduliavimas**, kuris rodo, kad galaktikų spiečiuose tarpai tarp galaktikų užpildyti retų jonizuotų dujų, dar retesnių ir dar karš-

tesnių negu vainikinės dujos, užpildančios tarpus tarp dujų debesų ir jų aureolių mūsų Galaktikoje ir kitose galaktikose. Tarpgalaktinės dujos labiausiai telkiasi kuo arčiau spiečių centrų, kur stipriausias gravitacinis laukas, kur giliausia potencinė duobė. (Neužmirškime, kad didžiąją gravitacinio lauko dalį sukuria nematomoji medžiaga.) Tarpgalaktinių dujų kinetinė temperatūra siekia 10^7–10^8 K, o tankis – vos 10^{-2}–10^{-6} dalelės cm^{-3}. Esant tokiam karščiui, daugelis laisvų elektronų blaškosi dešimčių tūkstančių km/s greičiais. Atsitrenkdami į plikus atomų branduolius ar teigiamus jonus, jie praranda pagrindinę dalį savo didžiulės kinetinės energijos, kuri virsta naujai gimusių ištisinio spektro Rentgeno fotonų energija.

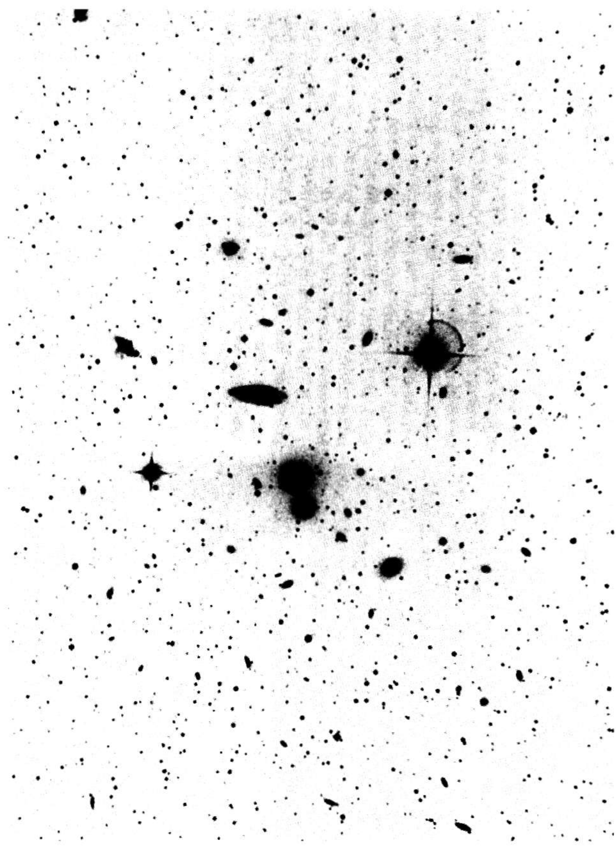
Tarpgalaktinių dujų emisijos linijas Rentgeno srityje sukuria sužadinti geležies, silicio, sieros, magnio teigiamieji jonai. Dėl didelio karščio jie yra netekę daugumos savo elektronų. Aplink branduolį belikę skrieti vos 1–3 elektronai. Emisijos linijų ekvivalentinis plotis parodė, kad šių cheminių elementų procentas tarpgalaktinėse dujose yra maždaug toks pat kaip ir Saulėje.



8.44 pav. *Galaktikų spiečiaus, matomo Kentauro žvaigždyno kryptimi, centrinė dalis*

Nežiūrint nepaprastai mažo tarpgalaktinių dujų tankio, jų masė kiekviename spiečiuje dėl didelio spiečiaus tūrio maždaug prilygsta visų spiečiaus žvaigždžių masei. Kyla klausimai, iš kur tarpuose tarp galaktikų atsirado tiek daug dujų, kodėl jos tokios karštos ir kas joms prigamino normalų įprastinį kiekį už helį sunkesnių cheminių elementų?

Manoma, kad čia vyrauja iš galaktikų išmestos dujos. Dauguma jų, matyt, buvo išmesta per didžiąją pertrauką tarp žvaigždėdaros etapų. Šias dujas sunkiaisiais cheminiais elementais praturtino ir jas labai įkaitino, taigi ir įsismaginusią žvaigždėdarą nutraukė ypač gausūs supernovų sprogimai. Vėliau tarpgalaktinių dujų atsargas spiečiuose dar papildydavo galaktikų susidūrimai ir labai greitas atskirų galaktikų judėjimas pro tarpgalaktines dujas. Šie procesai gali „iššluoti" iš galaktikos praktiškai visas jos dujas. O tuo metu atsiradusios smūginės ir magnetohidrodinaminės bangos tikriausiai daug prisidėjo palaikant aukštą tarpgalaktinių dujų temperatūrą, neleidžiant dujoms atvėsti

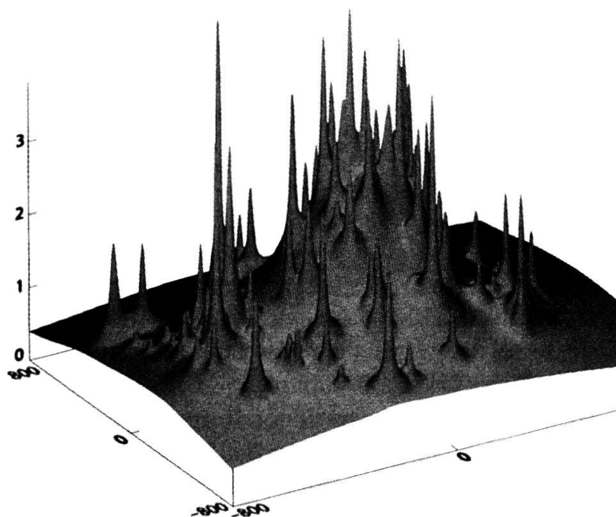


8.45 pav. *Galaktikų spiečiaus, matomo Hidros žvaigždyno kryptimi, centrinė dalis (negatyvinė nuotrauka)*

net per milijardus metų. Labai mažo tankio tarpgalaktines dujas pajėgia sėkmingai kaitinti ir iš galaktikų ištrūkę kosminiai bei subkosminiai spinduliai.

Tačiau, matyt, pasitaiko ir suspėjusių ataušti dujų. Jei kurioje nors vietoje dujų temperatūra pasidaro žemesnė negu aplinkoje, mažesnis negu aplinkoje pasidaro ir slėgis. Ta vieta yra aplinkos suspaudžiama. O padidėjus tankiui, padažnėja spinduliavimą sužadinantys dalelių tarpusavio smūgiai, pagausėja iš tos vietos sklindančių spindulių, kurie išneša daugiau buvusios šiluminės energijos. Ta vieta ima aušti dar greičiau, ji suspaudžiama dar labiau, o dėl to vėl greičiau krinta temperatūra ir t. t. Taip tarpgalaktinėse retose ir karštose dujose gali atsirasti daug didesnio tankio šaltos salos – mažai jonizuotų dujų debesys, panašūs į difuzinius debesis spiralinėse galaktikose. Vienas kitas toks debesis gali įkristi į artimiausias galaktikas.

Galaktikų spiečiai, kaip ir mažesnės galaktikų grupės, yra gravitacijos jėgų susietos sistemos ir nesiplečia. Bendrame Mūsų Visatos plėtimesi jie dalyvauja



8.46 pav. *Visos (ir spinduliuojančiosios, ir nematomosios) medžiagos pasiskirstymas labai kompaktiškoje galaktikų spiečiaus CL 0024 +1654 centrinėje dalyje. Spiečius yra už* $1{,}5\cdot10^9$ *pc Žuvų žvaigždyno kryptimi. x ir y ašyse atidėtas nuotolis nuo spiečiaus centro tūkstančiais šviesmečių, z ašyje – medžiagos koncentracija gramais, tenkančiais spiečiaus skerspjūvio ploto vienam* cm^2*. Pavienės smailos viršūnės yra švytinčios galaktikos. Jas supa daug didesnio skersmens nematomosios medžiagos vainikai – atskirų iškilimų platūs pagrindai. Arčiau spiečiaus centro nematomosios medžiagos vainikai susilieja į vientisą didžiulį kalną, kurio atskiras viršūnes sudaro ypač kompaktiška centrinė galaktikų grupė, atsidūrusi labai gilioje gravitacinio lauko potencinėje duobėje. Tokį medžiagos pasiskirstymą parodo gravitacinio lęšio reiškinys: tarp spiečiaus galaktikų matosi ištempti, iškraipyti ir kelis kartus pakartoti daug tolimesnių galaktikų vaizdai – miražai. Jie leidžia apskaičiuoti pralekiančių spindulių kryptis pakeitusio spiečiaus gravitacinio lauko struktūrą. Grafiko matematinė analizė rodo, kad žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos pavidalu galaktikose šviečia vos 10% visos spiečiaus medžiagos*

tik ta prasme, kad tolsta vienas nuo kito. Kiekviena galaktika individualia sudėtinga orbita skrieja apie savojo spiečiaus masės centrą. Šį judėjimą rodo atskirų spiečiaus narių spindulinių greičių skirtumai, kurie siekia šimtus ir tūkstančius km/s. Remiantis šia greičių dispersija, apskaičiuojama spiečiaus masė, kuri paaiškėjo esanti apie 10 kartų didesnė negu gautoji bandant įvertinti visų žvaigždžių skaičių visose spiečiaus galaktikose, įskaitant ir tas spėjamas, tačiau neįžiūrimas mažos masės galaktikas, kurių turėtų būti spiečiuje. Tai ir yra vienas iš argumentų, tvirtinančių, kad galaktikas gaubia hipotetinė nematomoji medžiaga. Tą pačią išvadą, kad apie 90% visos masės galaktikų spiečiuje atitenka nematomajai medžiagai, verčia padaryti ir tie spiečiai, kuriuos mes stebime kaip gravitacinius lęšius (žr., pavyzdžiui, **8.46** pav.).

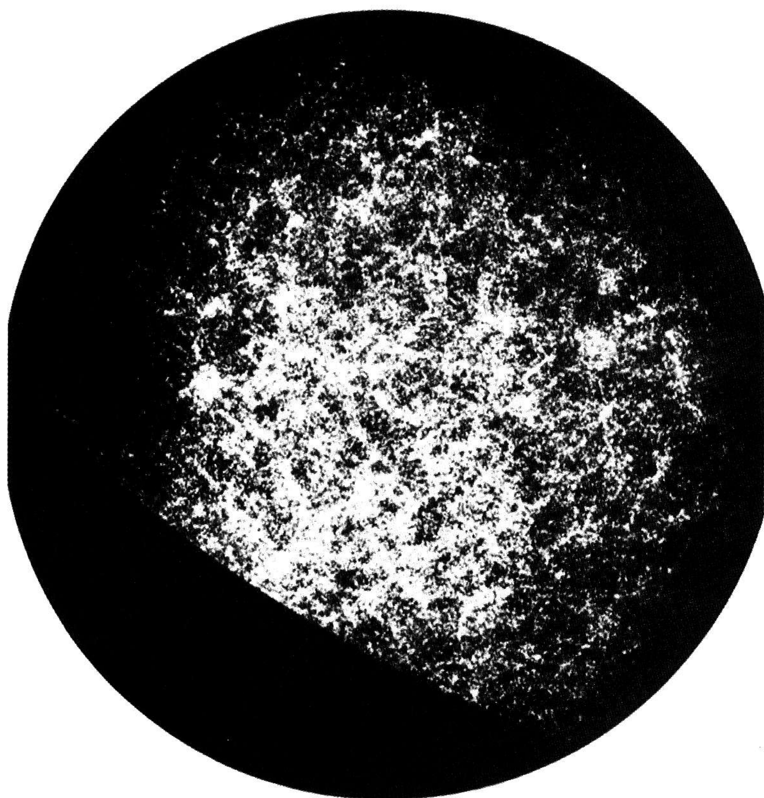
Maždaug 30% galaktikų spiečių struktūra nėra vieninga – jų viduje užčiuopiamos atskiros galaktikų grupės. Vadinasi, tokie spiečiai dar neužbaigė savo formavimosi, jų vidinė struktūra dar neišsilygino. O tai, matyt, reikštų, kad dideli spiečiai formuojasi susiliejant mažesniems.

8.6.4. Galaktikų superspiečiai. Korėta Mūsų Visatos struktūra

Galaktikų grupių ir tolimesnėms, neįžiūrimoms galaktikų grupėms atstovaujančių dvinarių, trinarių ir daugianarių galaktikų pasiskirstymo erdvėje analizė rodo grupių tendenciją jungtis į būrius. Tokie galaktikų grupių būriai dažniausiai esti pailgos ar maždaug plokščios formos, beveik jungiasi vieni su kitais ir tuo būdu nusidriekia savotiškomis sienomis. Sienose yra ir galaktikų spiečių. Sienos vienos su kitomis kertasi ir sudaro kažką panašaus į viena prie kitos ir viena ant kitos sukrautų netaisyklingos formos dėžių krūvą. Užčiuopiame keliasdešimt artimesnių „dėžių“. Vidutiniškai „dėžės“ skersmuo yra apie 100 Mpc, o jos „sienų“ storis – keliolika Mpc. Dauguma galaktikų yra susibūrusios „dėžių“ sienose. O „dėžių“ viduje galaktikų labai mažai. Galbūt visa stebimoji Mūsų Visatos dalis, kurią vadiname ***Metagalaktika***, o gal ir visa Mūsų Visata sudaryta iš tokių „dėžių“ ar „bičių korių“ (žr. **8.47** pav.).

Stambiausi galaktikų spiečiai paprastai yra „dėžių sienų“ sankirtose. Jie yra vadinamųjų galaktikų ***superspiečių*** centrai. Superspiečius – tai centrinis spiečius ir nuo jo į įvairias puses nutįsusios „dėžių“ sienų artimesnės dalys. Neretai beveik susiliedami tarpusavyje, superspiečiai kaip tiktai ir sudaro „korėtos“, daugmaž iš atskirų „dėžių“ susidedančios Metagalaktikos struktūros pagrindą. Viename superspiečiuje esti keletas (kartais dešimtys) įvairaus stambumo galaktikų spiečių ir galaktikų grupių būrių.

Panašu, kad superspiečiai, kitaip negu spiečiai ir grupės, nėra tarpusavio traukos jėgos surištos sistemos, nes jie plečiasi kartu su visa Metagalaktika.



8.47 pav. *Kompiuterio nupieštas galaktikų pasiskirstymo danguje vaizdas. Čia matome daugiau kaip milijoną galaktikų, ne silpnesnių kaip 19-ojo ryškio. Galaktikos šiaurinis ašigalis yra skritulio centre, Galaktikos pusiaujas – išorinis apskritimas. Išryškėja korėta Metagalaktikos struktūra*

Tik dar negalima pasakyti, ar plėtimosi greitis vieno superspiečiaus viduje visiškai atitinka Hablo dėsnį (**8.17**), ar yra šiek tiek mažesnis.

Atrodo, kad Vietinė grupė kartu su gretimomis grupėmis priklauso galaktikų grupių būriui, kuris yra vienos, nuo Mergelės spiečiaus nutįsusios „dėžių" sienos dalis. Taigi mes esame vadinamajame Lokaliniame arba Mergelės superspiečiuje. Jo centras yra Mergelės galaktikų spiečius.

Kiti artimesni superspiečiai matomi šių žvaigždynų kryptimis: Lūšies – Grįžulo Ratų ($r \approx 70$ Mpc), Hidros – Kentauro ($r \approx 70$ Mpc), Persėjo ($r \approx 100$ Mpc), Liūto ($r \approx 140$ Mpc), Berenikės Garbanų ($r \approx 140$ Mpc), Heraklio ($r \approx 190$ Mpc). Dar verta paminėti mažiau ištirtus Šiaurės Vainiko, Povo – Indėno superspiečius.

8.7. GALAKTIKŲ KILMĖ IR RAIDA

8.7.1. Žvaigždžių ir galaktikų atsiradimo priešistorė

Tamsos laikotarpis Mūsų Visatoje

Mūsų Visata, kaip rodo 9-jame skyriuje aptariami jos kilmės ir raidos modeliai, pradžioje buvo labai karšta, labai didelio tankio ir labai greitai keitėsi. Po 5 minučių jos cheminė sudėtis jau buvo tokia pat, kokią ir paveldėjo pačios seniausios žvaigždės. Būtent protonai sudarė per 90%, o ^{4}He branduoliai per 9% visų atomų branduolių skaičiaus. Gerokai mažiau nei 1% šio skaičiaus sudarė deuterio, tričio, lengvojo helio, ličio, berilio, boro, anglies, azoto, deguonies, gal ir dar sunkesnių elementų branduoliai paėmus drauge. Teigiamų elektros krūvių skaičių atitiko neigiamą krūvį turinčių elektronų skaičius – Visata buvo elektriškai neutrali. Temperatūra, nors ir labai sparčiai žemėjanti Visatai didžiuliu greičiu plečiantis, dar tebesiekė $6 \cdot 10^8$ laipsnių, elektronai dar tebebuvo laisvi, dar negalėjo skrieti apie atomų branduolius. Šioje beveik vientisoje kosmologinėje plazmoje ypač daug (net milijardą kartų daugiau negu protonų ir helio branduolių) buvo fotonų ir visų rūšių neutrinų su antineutrinais. Galbūt buvo ir daugybė įvairių kitų labai silpnai sąveikaujančių dalelių (WIMP'ų (žr. 9.7.2), kurias fizikai dar tik bando, darydami eksperimentus, aptikti.

Po 300–400 tūkstančių metų, kai kosmologinės plazmos temperatūra nukrito iki maždaug 3000 laipsnių, laisvieji elektronai rekombinavo su protonais ir kitais atomų branduoliais. Atsirado su fotonais, neutrinais ir galbūt su minėtomis silpnai sąveikaujančiomis dalelėmis susimaišiusios vandenilio ir helio neutralios dujos su menkomis sunkesnių atomų priemaišomis. Žemėjant temperatūrai, fotonai iš trumpabangių pavirto infraraudonaisiais bei regimosios šviesos fotonais ir daugiau nebepajėgė jonizuoti atomų.

Per keletą milijonų metų šio besiplečiančio kosmologinio dujų debesies temperatūra sumažėjo iki 900–400 K. Labai gausūs fotonai dar labiau nusilpo – pasidarė dar ilgesnių bangų, taigi mažesnės energijos. Praktiškai nebeliko regimosios šviesos fotonų – visi jie pagaliau nuslinko į IR sritį. **Mūsų Visatoje pasidarė tamsu.** Kartu per tą laiką labai sustiprėjo jau nuo pat plėtimosi pradžios buvę visiškai nedideli materijos tankio nevienodumai. Dėl šių priežasčių atskiroms didesnio tankio sritims darėsi vis sunkiau įveikti gravitacijos jėgą. Šių sričių plėtimosi greitis pradėjo vis labiau atsilikti nuo visos Mūsų Visatos plėtimosi greičio. Taigi dar labiau ryškėjo tankio nevienodumai.

Kosmologinio dujų debesies vientisumą ir vienodumą galėjo trikdyti ir hipotetiniai labai koncentruoti didžiuliai nežinomos prigimties materijos telki-

niai, įvairiomis kryptimis nusidriekę stygų ir sienų pavidalu (žr. **9.7.2**). Jų storis – galbūt vos 10^{-30} m, o ilgis – tūkstančiai o gal ir milijardai parsekų. Vadinamoji ***kosmologinių stygų hipotezė*** (žr. **9.7.4**) teigia, kad šitokios ***stygos*** ir ***sienos*** lyg kažkokie topologiniai defektai turėjo susiformuoti dar Mūsų Visatos evoliucijos pirmosios sukundės pradžioje, kuriantis elementariosioms dalelėms. Dalis šių materijos koncentratų galėjo išlikti gana ilgai, pavyzdžiui, šimtus milijonų ar net milijardus metų. Pasak modelio, kosmologinės stygos ir sienos, o ypač jų užlinkimų ir susikryžiavimų vietos turėjo intensyviai skleisti elektromagnetines ir gravitacines bangas. Tokioms stipriai spinduliuojančioms vietoms greitai judant, kosmologiniame debesyje turėjo susidaryti tam tikras smūginių bangų tinklas, padėjęs kosmologinio debesies medžiagai susigrupuoti į atskirus didesnio tankio fragmentus. Kartu su stygomis ir sienomis galėjo susidaryti ir kitokie materijos koncentratai, irgi turėję įtakos aplinkinių dujų struktūrai, pavyzdžiui, ***magnetiniai monopoliai*** (žr. **9.7.2**), taip pat įvairių masių juodosios bedugnės. Visiškai mažų masių juodosios bedugnės iki mūsų dienų neišliko. Mat jų aplinka skleidžia stiprius fotonų ir elementariųjų dalelių bei antidalelių srautus. Kuo mažesnės masės juodoji bedugnė, tuo stipriau spinduliuoja jos aplinka, o nuo to juodosios bedugnės masė dar greičiau mažėja. Visa tai baigiasi tiesiog stipriu sprogimu, sukeliančiu smūgines bangas aplinkinėje medžiagoje. Didelių masių juodosios bedugnės aplinkinę medžiagą veikė kitaip – sukurdamos stiprius traukos centrus.

Vienokiu ar kitokiu būdu kosmologiniame debesyje atsiradę tankio nevienodumai ilgainiui vis didėjo, didesnio tankio sričių plėtimosi greitis sparčiai mažėjo. Maždaug per 10^8 metų jos visiškai nustojo plėstis ir pradėjo trauktis kiekviena į savo centrą – pagaliau buvo patenkintas Džinso nestabilumo kriterijus (**6.2**). (Besiplečiančiame kosmologiniame debesyje Džinso nestabilumo kriterijaus reikalavimai daug griežtesni, ribinė Džinso masė turėtų būti tūkstantį ar daugiau kartų didesnė negu to paties tankio ir temperatūros nesiplečiančiose dujose, kurioms galioja (**6.2**) sąryšis.) Tuo būdu kadaise buvęs ištisinis kosmologinis debesis suskilo į nesuskaičiuojamą daugybę atskirų fragmentų, kurių kiekvienas traukėsi į savo centrą ir kartu dėl Visatos plėtimosi tolo vienas nuo kito.

Šiems fragmentams traukiantis, Džinso nestabilumo kriterijų galėjo pradėti patenkinti ir atskiros kai kurių fragmentų dalys. Jei taip atsitiko, toks fragmentas turėjo suskilti į smulkesnes dalis, toliau besitraukiančias savarankiškai. Šitoks skaldymasis galėjo kartotis keletą kartų.

Antra vertus, pirmykščiam kosmologiniam dujų debesiui susiskaldžius į atskirus fragmentus – nematomosios medžiagos ir dujų mišinio telkinius, tie telkiniai galėjo ne tik skaldytis į smulkesnius fragmentus, bet ir jungtis į gravitacijos jėgų surištas sistemas. Juk Mūsų Visata dar tebebuvo daug mažiau išsiplėtusi. Pradedant formuotis galaktikoms, visi nuotoliai dar tebebuvo 30–10 kartų

mažesni negu dabar. Todėl atskiri medžiagos telkiniai buvo visiškai arti vienas kito, stipriai jautė vienas kito trauką, neretai susidurdavo.

Tad kaipgi ir per kiek laiko iš atskirų dujų telkinių susidarė žvaigždžių ir galaktikų įvairovė, kaip susiformavo galaktikų grupės, grupių būriai, galaktikų spiečiai, superspiečiai, kodėl ir kaip susidarė korėta Metagalaktikos struktūra? Kas ta paslaptingoji nematomoji medžiaga, kiek jos yra, kaip ji pasiskirsčiusi Mūsų Visatoje, kokį vaidmenį ji suvaidino formuojantis žvaigždėms ir jų sistemoms, kaip ji veikia galaktikų evoliuciją?

Į visus šiuos klausimus kol kas dar nėra vieningo ir įtikinamo atsakymo. Skirtingų mokslininkų grupių kuriami modeliai galaktikų ir jų sistemų kilmę ir raidą kol kas aprašo dar labai apytikriai, neišsamiai ir, blogiausia, labai skirtingai.

Mes dabar užčiuopiame korėtą ir hierarchinę Metagalaktikos struktūrą (žr. **8.6.**) – galaktikų grupės linkusios telktis į gana plokščius būrius, išsirikiavusius „dėžių“ ar „bičių korių akučių“ „sienose“. O „dėžių“ sienų sankirtose matome stambiausius galaktikų spiečius – galaktikų superspiečių centrus. „Dėžių“, taigi ir superspiečių matmenys didėja – dėl bendro Mūsų Visatos plėtimosi vienas nuo kito tolsta galaktikų grupių būriai ir galaktikų spiečiai. O patys spiečiai ir grupės nesiplečia – čia galaktikos susijusios tarpusavio traukos jėgomis.

Vadinasi, pirminis kosmologinis debesis suskilo ne į būsimuosius galaktikų superspiečius, o į mažesnės masės nematomosios medžiagos ir dujų mišinio telkinius. Yra modelių, teigiančių, kad jis suskilo į būsimuosius galaktikų spiečius ir galaktikų grupių būrius.

Pagal šitokius modelius nemaža dalis šių pirmųjų pirminio kosmologinio debesies fragmentų – milžiniškų nematomosios medžiagos ir dujų debesų – traukėsi nesimetriškai. Juk labiausiai tikėtina, kad tokio debesies skirtingose vietose medžiagos tankis nėra visiškai vienodas. O didesnio tankio vietų kryptimi jaučiama stipresnė gravitacijos jėga, padidinanti traukimosi greitį šia kryptimi. Dėl to tankio nevienodumai dar padidėjo, ir atskiros debesų dalys, matyt, susitraukė į gigantiškus pailgus „blynus“, kuriuose medžiagos tankis pasidarė daug didesnis nei kitur. Tokie „blynai“ sukūrė stiprų gravitacinį lauką, kurio veikiama ant jų dideliu greičiu ėmė kristi tolimesnė medžiaga. Tai sukėlė smūgines bangas, audringą ir sudėtingą medžiagos judėjimą. „Blynai“ dar pailgėjo ar paplatėjo, persipynė su kaimynais. Besitraukdami jie suskilo į daugybę smulkesnių debesų – ***progalaktikių,*** kurios traukėsi toliau ir ilgainiui, vykstant žvaigždėdarai, virto galaktikomis. Taigi buvę „blynai“, matyt davė pradžią toms galaktikoms, kurias dabar randame „dėžių“ sienose. O stambių spiečių kilmę galbūt nulėmė skirtingų „blynų“ susidūrimai ir medžiaga, kuri traukėsi ne į „blynus“, o daug simetriškiau. Tokie mažai susiploję debesys toliau traukdamiesi suskilo į progalaktikes, kurios virto galaktikomis – šitaip atsiradusio spiečiaus narėmis.

Tačiau tokie hierarchinio skaldymosi modeliai dar nėra pakankamai įtikinami, sulaukia prieštaravimų. Pavyzdžiui, beveik kas trečiame galaktikų spiečiuje aptinkama nepakankamai vieninga struktūra – galaktikos rodo tendenciją spiečiaus viduje išsidėstyti atskiromis grupėmis. Galbūt tai reiškia, kad stambūs galaktikų spiečiai susidaro susiliejant buvusioms atskiroms nedidelėms galaktikų grupėms – mes stebime dar galutinai neužbaigtą tokio susiliejimo procesą.

Argumentu už jungimosi, susibūrimo, o ne hiearchinio skaldymosi tendenciją galbūt galima laikyti ir Hablo kosminiu teleskopu gautas dvi pirmąsias „gilaus lauko" nuotraukas (žr. **8.3.2** skirsnelį ir **8.24** bei **8.25** pav.). Šiose nuotraukose visos pačios tolimiausios, taigi iš giliausios praeities matomos galaktikos, susiformavusios praėjus keliems šimtams milijonų metų nuo Mūsų Visatos pradžios, yra smulkutės, mažos masės. Tai tarytum patvirtina ir šimtai labai tolimų ir smulkių galaktikėlių, vėliau aptiktų Hablo kosminiu teleskopu ir didžiaisiais antžeminiais teleskopais kitose dangaus vietose. Šis faktas perša mintį, kad stambiosios galaktikos atsirado vėliau, susiliejus daugeliui smulkiųjų galaktikėlių ar tiesiog žvaigždžių grupių. O kaip susidarė šios smulkiosios galaktikėlės? Galbūt traukiantis ir skaldantis į fragmentus atitinkamai mažos masės debesų pavidalo progalaktikėms.

Yra ir tokių kraštutinių hipotezių, kurios teigia, kad pirminis kosmologinis debesis iš karto suskilo į tokius smulkius debesis, iš kurių susidarė tik nedidelės žvaigždžių grupės ar net pavienės žvaigždės, vėliau palaipsniui susibūrusios ir tarpusavio traukos jėga susirišusios į įvairaus dydžio galaktikas, o pastarosios – į galaktikų grupes, grupių būrius, spiečius.

Yra samprotavimų, jog pačios pirmosios žvaigždės susidarė labai didelės masės, net tūkstančius, o gal ir šimtus tūkstančių kartų masyvesnės už Saulę. Aišku, jos buvo nestabilios ir spinduliavo visiškai trumpai, nes greitai virto juodosiomis bedugnėmis, kurios tapo traukos centrais aplinkinei medžiagai, savotiškomis „sėklomis". Aplink tokias „sėklas" ėmė formuotis nedidelės galaktikos. Kai tokios galaktikos su masyviomis juodosiomis bedugnėmis centruose susiduria ir susilieja, juodosios bedugnės, matyt, irgi susilieja, jų masė didėja. Ji didėja ir dėl medžiagos kritimo į juodąją bedugnę. Tuo būdu centrinės juodosios bedugnės masė ilgainiui gali išaugti net iki milijardų saulių masės. Ši hipotezė tarytum neblogai dera su pradedančia įsigalėti nuomone, kad daugelio, gal ir visų galaktikų centruose yra po milžiniškos masės juodąją bedugnę.

Tačiau nepaisant daugelio mokslininkų pastangų iki šiolei vis dar nėra sukurta pakankamai įtikinamo teorinio modelio, kuris parodytų, kaip iš susiliejusių mažų galaktikų susiformuoja tokia stambi spiralinė galaktika, kokia, pavyzdžiui, yra mūsų Galaktika. Galbūt ateityje mes aptiksime ir stambių galaktikų, susiformavusių tuo pačiu laiku kaip ir smulkiosios.

Pačios pirmosios žvaigždės turėjo susidaryti iš dujų, kuriose dar beveik

nebuvo už helį sunkesnių cheminių elementų, o dėl to nebuvo ir dulkelių. Tačiau kol kas dar nepasisekė sukurti teorinių modelių, kurie parodytų, kaip tokių dujų gniužulas, tęsdamas savo susitraukimą, galėtų suskilti į atskirus fragmentus, kurie toliau trauktųsi savarankiškai, kiekvienas į savo centrą ir galiausiai virstų žvaigždžių grupe. Galbūt tokia, dabar masiškai vykstanti fragmentacija pasidarė galima tik vėliau, kai pirmosios masyvios žvaigždės, ypač sprogdamos kaip supernovos, bent šiek tiek praturtino kitų būsimų žvaigždžių statybinę medžiagą sunkiaisiais elementais. Jei tai tiesa, būsimosiose galaktikose pirmiausiai turėjo susidaryti tik po vienintelę žvaigždę.

Kaip matome, galaktikų kilmėje ir raidoje dar daug neaiškumų. Kol kas dar neverta pateikti išsamesnių galaktikų kilmės ir raidos aiškinimų, nes jie dar tebėra labai prieštaringi. Šiek tiek daugiau dėmesio skirsime vien tik spiralinių galaktikų istorijai laikantis klasikinio, jau daugiau kaip pusšimtį metų nagrinėjamo aiškinimo, kad kiekviena S galaktika susiformavo iš savos vientisos progalaktikės – nematomosios medžiagos ir dujų debesies. Darysime prielaidą, kad visos S galaktikos, priešingai negu E galaktikos, yra išvengusios susiliejimo su stambiomis galaktikomis, o smulkių galaktikų ir atskirų difuzinės medžiagos debesų įkritimai (net jei jų būta ir nemažai) nepajėgė iš esmės pakeisti galaktikos istorijos.

8.7.2. Progalaktikių virsmas galaktikomis

Taigi laikysimės hipotezės, kad pirminio kosmologinio debesies skaldymosi, galbūt ir kai kurių susiskaldžiusių fragmentų jungimosi procesas baigėsi progalaktikių atsiradimu. Progalaktikių masė labai įvairi – nuo milijonų iki šimtų milijardų $M_{\odot}$.

Laikantis hipotezės, kad nematomąją medžiagą sudaro neutrinai, WIMP'ai ir kitos hadronams nepriklausančios elementariosios dalelės, galima manyti, kad būsimoji galaktika – tai visų pirma nematomosios medžiagos debesis. Ir tik jo centrinėje dalyje (gravitacinėje duobėje) yra susibūrusios vandenilio ir helio (su menkomis sunkesnių elementų priemaišomis) dujos, kurių masė tesudaro apie 10% progalaktikės masės. Ir priešingai, laikantis vadinamosios barioninės nematomosios medžiagos hipotezės, vandenilio, helio ir sunkesnių elementų dujoms tenka atiduoti visą būsimosios galaktikos tūrį ir masę. Tačiau šiuo atveju tik 0,1 ar dar mažesnė šių dujų dalis turi patekti į šviečiančių žvaigždžių sudėtį, o 90% – į mažesnės masės tamsių kūnų sudėtį.

Progalaktikė tenkino Džinso nestabilumo kriterijų ir labai iš lėto traukėsi, jos dujos artėjo centro link. Kai jos skersmuo kelis kartus sumažėjo ir medžiagos tankis pakankamai padidėjo, medžiagos dalelių tarpusavio traukos jėga tiek išaugo, kad progalaktikės viduje Džinso nestabilumo kriterijų

ėmė tenkinti ir kai kurios atskiros didesnio tankio sritys. Dėl to jos kiekviena pradėjo trauktis į savo centrą. Tuo būdu progalaktikėse atsirado labai didelių debesų, kurie patys traukėsi ir kartu tęsė labai lėtą kritimą progalaktikės centro link. Tuo pat metu jie dar ir netvarkingai judėjo vienas kito atžvilgiu, susidūrinėjo tarpusavyje. Susidūrimų sukeltos smūginės bangos vietomis dujas dar labiau suspausdavo, tiesa, kartu pakeldavo ir jų temperatūrą. Tačiau suspaustos vietos pamažu vėl atšaldavo. O tuomet Džinso nestabilumo kriterijų jau tenkindavo ir atskiros jų dalys. Taip dideli debesys susmulkėjo, virto būsimaisiais įvairios masės žvaigždžių spiečiais. Galų gale tokie būsimieji žvaigždžių spiečiai suskilo į daugybę besitraukiančių dujų gniužulų. Tęsdami susitraukimą, o kai kurie dar ir skaldydamiesi, tokie gniužulai pradėjo virsti žvaigždėmis – spiečių nariais. Būsimosiose galaktikose prasidėjo **žvaigždėdara**, iš pradžių arčiau progalaktikių centrų, kur didesnis dujų tankis, o vėliau ir pakraščiuose.

Daugelis žvaigždžių spiečių ir įvairaus dydžio žvaigždžių grupių ilgainiui iširo, jų žvaigždės išsisklaidė ir tapo palaidomis pavienėmis, dvinarėmis ir daugianarėmis žvaigždėmis. Iki mūsų dienų išsilaikė tik patys patvariausi kamuoliniai spiečiai, ypač tokie, kurių orbitos leido išvengti laikinų suartėjimų su kitais spiečiais ar kitokiais didelės masės telkiniais. Tokie suartėjimai sukelia stiprias potvynio jėgas, ardančias suartėjusius spiečius ar debesis.

8.7.3. Kaip susiformavo antrosios populiacijos objektų orbitos?

Iš pradžių visų rūšių galaktikos formavosi gana panašiai. Būtent, progalaktiniam debesiui traukiantis, vyraujantis jo dujų judėjimas vyko būsimosios galaktikos centro lik. Tokį judėjimą perėmė ir naujagimės žvaigždės. Tačiau dujos traukėsi lėčiau – jas šiek tiek prilaikė slėgio gradientas (didėjimas artėjant prie debesies centro). Juk arčiau progalaktinio debesies centro dujų tankis, vadinasi, ir slėgis yra didesnis negu jo pakraščiuose. O naujai susiformavusių žvaigždžių judėjimui mažo tankio dujų slėgis ir jo gradientas jau negalėjo turėti jokios įtakos. Todėl tik ką susiformavę žvaigždžių spiečiai ir pavienės žvaigždės, veikiami visos galaktikos traukos jėgos, nukreiptos į galaktikos centrą, ėmė judėti jo link su laisvo kritimo pagreičiu ir todėl pagreitėjo iki kelių šimtų km/s. Dauguma šitaip krintančių objektų pralėkė ne per patį centrą, o šalia jo, vieni arčiau, kiti toliau. Taip atsitiko dėl to, kad dujos, iš kurių susiformavo žvaigždės, ne tik slinko būsimosios galaktikos centro link, bet dar ir chaotiškai įvairiomis kryptimis judėjo patekusios į visokias sroves ir sūkurius. Kai žvaigždė (arba jų spiečius) lekia netoli galaktikos centro pro šalį, visos galaktikos traukos jėgų atstojamoji žvaigždės kelią užlenkia,

žvaigždė vėl ima tolti nuo centro, tik jau nebe į tą pusę, iš kurios atlėkė, o kažkur į šoną. Orbita užlenkiama ne 180°, o daug mažiau dėl to, kad veikia sudėtingos struktūros gravitacinis laukas, kurį sukuria ne vienas koks centrinis kūnas, o medžiaga, pasklidusi po visą besiformuojančią galaktiką. Žvaigždei tolstant nuo galaktikos centro, įgyta didžiulė kinetinė energija vėl ima virsti potencine. Kai žvaigždė pasiekia truputį didesnį atstumą nuo galaktikos centro negu tą, kuriame ji tapo žvaigžde, jos visa kinetinė energija, susijusi su tolyn nuo centro nukreiptu greičio komponentu, jau būna virtusi potencine energija. Žvaigždė vėl pradeda greitėdama kristi maždaug į centrą, jos potencinė energija vėl ima virsti į kinetinę, vėl viskas kartojasi iš pradžių. Susiklosto sudėtinga ir neuždara žvaigždės (arba spiečiaus) orbita, panaši į labai ištęstą elipsę, kuri gana greitai sukasi savo plokštumoje, o ir plokštuma iš lėto kinta. Toli nuo galaktikos centro gimusios žvaigždės turi dideles orbitas, jos buvoja ir galaktikos centro, ir periferijos aplinkoje. O arti centro susidariusios žvaigždės nebeįgyja tokios didelės kinetinės energijos, kurios pakaktų joms pasiekti galaktikos pakraščius. Tokios žvaigždės skrieja mažomis ištęstomis orbitomis, visą laiką likdamos netoli centro.

Taip formavosi ne tik elipsinės ir netaisyklingosios galaktikos, bet ir spiralinių galaktikų sferoidas bei dalis centrinio telkinio. Galaktikų formavimosi pradiniame laikotarpyje susidariusias labai ištęstomis orbitomis skriejančias žvaigždes ir jų spiečius vadiname ***II populiacijos objektais.*** Jie susidarė iš dar nepraturtintų dujų, kuriose už helį sunkesnių elementų tebuvo kelias dešimtis ar net kelis šimtus kartų mažiau negu Saulėje. Tokios žvaigždės vadinamos ***nemetalingosiomis žvaigždėmis.***

8.7.4. Žvaigždėdaros nelygumai ir galaktikų vėjas. Galaktikų cheminė evoliucija

Tose besiformuojančių galaktikų vietose, kur susidarydavo didesnis dujų tankis ar žemesnė jų temperatūra, žvaigždėdara pagreitėdavo, atsirasdavo daug naujų žvaigždžių, tarp jų ir labai masyvių, kurios greitai (per milijonus ar dešimtis milijonų metų) suspėdavo sprogti kaip II tipo supernovos. Masyvių žvaigždžių galingas vėjas, čiurkšlės ir ultravioletiniai spinduliai, ypač supernovų sprogimai įkaitina ir išjudina, suaudrina net ir gana tolimas aplinkines dujas. Kur tokie reiškiniai pasidarydavo labai gausūs, dujos nustodavo traukotis. Dalis jų net išmetama į tarpgalaktinę erdvę. Toje galaktikos vietoje žvaigždėdara laikinai nutrūkdavo arba bent susilpnėdavo. Tačiau į tarpgalaktinę erdvę išmetamų dujų srautas, vadinamas ***galaktikų vėju,*** nebūtinai turėdavo nutrūkti, nes žvaigždėdaros nusilpimą vienoje vietoje galbūt galėdavo kompensuoti žvaigždėdaros pagreitėjimas kitoje vietoje.

Masyvioms žvaigždėms greitai perėjus į III evoliucijos etapą ir tapus raudonomis supermilžinėmis ar milžinėmis, jų išsipūtusiuose išoriniuose sluoksniuose atsiranda konvekcija, kurios apatinė riba leidžiasi vis giliau ir galiausiai pasiekia vidinius sluoksnius, kuriuose branduolinės reakcijos jau suspėjusios prigaminti įvairių už helį sunkesnių elementų. Taip jie patenka į išorę, o iš ten žvaigždžių vėjas ir planetiškųjų ūkų sklaidymasis juos išmeta į tarpžvaigždinę erdvę. Dėl to žvaigždžių susidarymui dar nesuspėtos sunaudoti dujos – naujų žvaigždžių statybinė medžiaga – darosi vis turtingesnės – jose vis didėja už helį sunkesnių elementų procentas. Ypač dujas praturtina supernovų sprogimai. Tuo būdu vidutiniškai kuo vėliau gimusi žvaigždė, tuo ji turtingesnė, tuo joje didesnis už helį sunkesnių elementų procentas. Kartu jaučiama tendencija vėliau gimusioms žvaigždėms labiau koncentruotis į galaktikos centrą ar jos pagrindinę plokštumą – juk taip palaipsniui traukėsi žvaigždžių statybinės medžiagos likučiai.

Koreliaciją tarp žvaigždžių amžiaus, jų masės, jų vietos galaktikoje, jų orbitų ypatybių ir jų pradinės bei vėliau pakitusios cheminės sudėties bando nagrinėti galaktikų cheminės evoliucijos modeliai, į kurių kūrimą įsitraukė ir Vilniaus astronomai. Nagrinėjama, kokios branduolinės reakcijos galėjo vykti žvaigždžių gelmėse, kiek ir kokių cheminių elementų ir jų įvairių izotopų jos prigamino, kaip ir kuri dalis šių produktų patenka į naujų žvaigždžių statybinę medžiagą skirtingose galaktikose ir skirtingose galaktikų vietose, kaip visa tai keičiasi bėgant laikui.

Tačiau šiuos nagrinėjimus apsunkina galimi žvaigždėdaros nelygumai, jos protrūkiai ir nusilpimai, galaktikų vėjo nelygumai, progalaktikės dujų traukimosi į besiformuojančios galaktikos centrą ir į pagrindinę plokštumą nelygumai, laikini šio traukimosi sustojimai dėl tarpžvaigždinių dujų įkaitimo sprogstant supernovoms.

Dar daugiau painiavos atsiranda dėl galaktikų susidūrimų ar bent suartėjimų. Šie reiškiniai, kaip ir jų padariniai gali būti labai įvairūs. Apie tai jau buvo minėta **8.2.1** ir **8.2.2** skirsneliuose. Jei susiduria dideli dujų kiekiai, smūginės bangos labai pagreitina žvaigždėdarą, naujai atsiradusios gausios masyviosios žvaigždės greitai prigamina daug sunkesniųjų elementų. Tokių susiliejusių galaktikų cheminėje evoliucijoje atsiranda gana staigus, tiesiog šuoliškas sunkesniųjų elementų procento padidėjimas. Ir atvirkščiai. Jei į toli savo evoliucijoje pažengusią galaktiką, kurios jauniausiose žvaigždėse jau yra daug naujai prigamintų sunkesniųjų elementų, iš kitos galaktikos arba iš tarpgalaktinės erdvės patenka beveik nepraturtintos dujos, tokioje galaktikoje tam tikrą laiką vėl ims susidarinėti mažiau metalingos žvaigždės.

Panašiai galėjo atsitikti ir be svetimos medžiagos intervencijos. Juk praėjus 2–3 milijardams metų nuo žvaigždėdaros pradžios, tretįjį evoliucijos etapą pasiekti bei raudonosiomis milžinėmis, o vėliau ir planetiškaisiais ūkais tapti pradėjo seniausios vidutinės masės žvaigždės. Priešingai negu masyviųjų

žvaigždžių atveju jų šerdyse pagaminti už helį sunkesni elementai beveik nepatenka į išorinius sluoksnius. Žvaigždžių vėjas ir planetiškųjų ūkų sklaidymasis tokias nepraturtintas dujas sumaišo su progalaktikės dujų likučiais, jau ankščiau praturtintais didelės masės žvaigždžių. Matome, kad ir šitokiu būdu kai kuriose galaktikose arba bent atskirose jų dalyse galėjo susiklostyti toks laikotarpis, kai žvaigždžių statybinėje medžiagoje sunkesniųjų elementų procentas laikinai beveik nedidėjo, o gal net mažėjo.

Tačiau beveik tuo pačiu laiku ar šiek tiek vėliau galaktikose pradėjo sprogінėti Ia tipo supernovos. Jei ankščiau masyviosios žvaigždės, tarp jų ir II tipo supernovos žvaigždžių statybinę medžiagą turtino daugiausia anglimi, deguonimi, azotu, neonu ir tik iš dalies geležimi, tai Ia tipo supernovos į tarpžvaigždinę erdvę ėmė išmesti ypač daug geležies, o kitokių sunkesniųjų elementų – daug mažiau. Geležies procentas žvaigždžių statybinėje medžiagoje ėmė sparčiai didėti ne tik vandenilio, bet ir, pavyzdžiui, deguonies atžvilgiu.

8.7.5. Galaktikų aktyvumo reiškinių atsiradimas

Per kelis šimtus milijonų metų daugelio besiformuojančių galaktikų centruose atsiradusių ar nuo pat žvaigždėdaros pradžios ten buvusių juodųjų bedugnių masės išaugo iki šimtų tūkstančių ar milijonų $M_{\odot}$. Anuomet labai dažni besiformuojančių galaktikų susidūrimai, suartėjimai, progalaktikinių dujų debesų įsiveržimai iš aplinkinės erdvės padėjo dideliems dujų kiekiams patekti į betarpišką jau pakankamai masyvios centrinės juodosios bedugnės aplinką ir ten sudaryti masyvų akrecinį diską. Taip Mūsų Visatoje atsirado pirmosios galaktikos su aktyvumo požymiais (žr. **8.4.4** skirsnelį). Laikui bėgant, tokių galaktikų vis gausėjo, aktyvumo požymiai darėsi vis galingesni. Pagaliau pasirodė patys galingiausi aktyvieji branduoliai – ***kvazarai.*** Jų skaičius sparčiai gausėjo ir, praėjus maždaug dviem milijardams metų nuo Mūsų Visatos atsiradimo, pasiekė savo maksimumą. Vėliau jis vėl pradėjo mažėti. Juk per tą laiką labai sumažėjo dar laisvų, į žvaigždes dar nesuspėjusių patekti dujų. Taip pat praretėjo ir galaktikų susidūrimai ar suartėjimai. Gali būti, kad beveik visos stambiosios galaktikos, tarp jų ir mūsiškė, yra pergyvenusios aktyviąją fazę, kai centrinė juodoji bedugnė buvo gausiai „maitinama“ dujomis.

8.7.6. Skirtingų rūšių galaktikų formavimosi ir raidos skirtumai

Kodėl galaktikos tokios skirtingos? Kodėl vienos spiralinės, kitos elipsinės, dar kitos netaisyklingosios? Kodėl vienos kompaktiškos, gana skaisčios, kitos anemiškos, labai blausios? Šių skirtumų priežasčių labai daug, jos nagrinėjamos, jas bandoma iššifruoti. Tačiau dar daug kas tebėra nežinoma. Panašu, kad svarbiausios šių skirtumų priežastys yra judesio kiekio momento ir susidūrimų su kitomis galaktikomis aplinkybių skirtumai – elipsinės priešingai negu spiralinės galaktikos beveik neturi judesio kiekio momento, daug kompaktiškesnės, daug labiau susikoncentravusios į centrą ir yra išgyvenusios įvairią ir sudėtingą susiliejimų su kitomis įvairiomis (ne tik smulkiomis) galaktikomis istoriją.

Judesio kiekio momentą galaktikos įgijo nesimetriškai susidurinėdamos arba prasilenkinėdamos su kitomis galaktikomis. Šis procesas galėjo prasidėti vos tik atsiradus progalaktikėms.

Normaliomis spiralinėmis galaktikomis galėjo tapti tik tokios progalaktikės, palaipsniui virstančios galaktikomis, kurios sukaupė pakankamai didelį judesio kiekio momentą, skaičiuojamą vienetinei masei. Taip pat, matyt, būtina, kad per visą istoriją galaktika išvengtų susiliejimo su kita ne mažesne galaktika, nes tai galų gale suformuotų jau nebe spiralinę, o elipsinę galaktiką. Smulkesnių galaktikų ir tarpgalaktinių dujų debesų įkritimai nesutrukdo stambesnei galaktikai tapti ir išlikti spiraline. Atvirkščiai, jie gali papildyti dujų atsargas, to kaip tik reikia spiralinei struktūrai atsirasti.

Galaktikų formavimosi pradžioje progalaktikių dujų tankis dar buvo gana mažas, dujos mažai tarpusavyje sąveikavo, judesio kiekio momento buvimas dar negalėjo išryškinti dujų debesies sukimosi apie savo ašį. Tada ir atsirado labai ištęstos II populiacijos žvaigždžių orbitos (žr. **8.7.3** skirsnelį). Taigi būsimosios S galaktikos, susiformavusios savo sferoidą ir didelę dalį centrinio telkinio, tuomet buvo panašios į besiformuojančias E galaktikas. Tik pastarosios daugeliu atvejų buvo kompaktiškesnės, didesnio tankio, jose greičiau vyko žvaigždėdara ir cheminė evoliucija.

Tačiau daug vėliau, po kelių milijardų metų, jei būsimosios spiralinės galaktikos dar tebeturėjo (ar buvo papildomai įsigijusios) daug dujų, jų tankis labai padidėjo, išryškėjo viso dujų debesies sukimasis apie ašį. Vis greitėjančio sukimosi sukelta inercijos išcentrinė jėga ėmė veikti prieš gravitacinės jėgos komponentą, nukreiptą į sukimosi ašį. Antrasis gravitacinės jėgos komponentas, nukreiptas išilgai sukimosi ašies, liko nesusilpnintas. Dėl to debesies traukimasis į centrą palaipsniui virto traukimusi į pagrindinę plokštumą, statmeną sukimosi ašiai. Dujų debesis darėsi vis plokštesnis ir ilgainiui tapo greitai ir tvarkingai besisukančiu disku.

Jei visos disko dujos greitai virto žvaigždėmis, matyt, susiformavo lęšinė galaktika S0. O jei dujų užteko daug ilgesniam laikui, žvaigždžių ir dujų mišinio diske pasirodė sutankėjimo bangos. Taip susiformavo spiralinė galaktika S, o vėliau ir spiralinė skersinė galaktika SB. Apie tai dar kalbėsime **8.7.8** skirsnelyje.

Jei judesio kiekio momentas ypač didelis, matyt, gali susiformuoti ne paprasta („normali“) S galaktika, o mažo skaisčio spiralinė galaktika LSB (žr. **8.1.1.1** skirsnelį).

Kai kurių E galaktikų regimuosiuose paviršiuose aptinkami silpnučiai, vos užčiuopami skaisčio nelygumai, primenantys spirales ar žiedus. Manoma, kad šiuo atveju lemtingai susiliejo dvi galaktikos, iš kurių bent viena jau buvo betampanti normalia spiraline galaktika, nes jau buvo pradėjusi formuoti savo spiralines vijas. Susidūrimas paskatino žvaigždėdarą, visos dujos greitai virto žvaigždėmis. Bent dalis dujų, prieš joms virstant žvaigždėmis, buvo nublokšta arti susiliejančių galaktikų centro ir tuo būdu padidino kompaktiškumą, masės koncentraciją į centrą, o tai ir būdinga E galaktikoms.

Sudarinėjama daugybė teorinių modelių, parodančių, kaip, susiliejant dviem įvairiausių rūšių galaktikoms, galų gale susidaro viena elipsinė galaktika, kaip susidūrimo metu prarandama didelė dalis judesio kiekio momento, kaip dėl to daug dujų patenka arti centro ir čia greitai virsta žvaigždėmis, labai padidina žvaigždžių koncentraciją į centrą.

Tuo būdu elipsinėmis galaktikomis tampa arba 1) tokios besiformuojančios galaktikos, kurios neįgijo didelio judesio kiekio momento ir iš pat pradžių buvo pakankamai kompaktiškos, kurių didelė masė buvo sukoncentruota į centrą, dėl to ten vyko greita žvaigždėdara, arba 2) tokios susidūrusios galaktikos, kurioms susidūrimas baigėsi susiliejimu prarandant dujas ir judesio kiekio momentą (jeigu buvo ką prarasti) labai padidinant naujagimių žvaigždžių skaičių arti centro.

Netaisyklingosios galaktikos labai įvairios, jų kilmė ir raida nevienoda. Vienos gal – tiesiog galaktikų susidūrimų skeveldros, atplaišos, kitos – gal nevykėlės pretendentės į S ar SB galaktikas, jomis netapusios dėl masės mažumo, dar kitos – gal buvę smulkūs pavieniai tarpgalaktiniai dujų debesys, vėliau susilieję su kitais ir tuo būdu padidinę savo masę ir tankį iki tokio lygio, kad prasidėtų žvaigždėdara.

8.7.7. Didžiosios pertraukos žvaigždėdaroje hipotezė

Dalis mokslininkų grupių daugelio spiralinių, gal ir elipsinių galaktikų žvaigždėdaros istorijoje įžvelgia buvus ne tik keletą jau minėtų nedidelių lokalinių pertraukų ar susilpnėjimų, bet ir bent vieną daug didesnę pertrauką, apėmusią beveik visą, gal ir visiškai visą besiformuojančią galaktiką ir užtru-

kusią labai ilgai – kelis šimtus milijonų ar net kelis milijardus metų. Tai hipotetinė vadinamoji ***didžioji žvaigždėdaros pertrauka.***

Teoriniai modeliai įvairiai aiškina jos priežastis ir aplinkybes. Čia paminėsime tik vieną iš šių modelių – ***karštosios fazės modelį.*** Pagal jį, didžiąją pertrauką arba, kitaip sakant, galaktikos raidos ***karštąją fazę*** sąlygojo labai pagreitėjusi, įsismaginusi žvaigždėdara, kurią nutraukė ypač gausūs supernovų sprogimai, gana staigiai įkaitindami visos galaktikos dujas iki dešimčių ar šimtų milijonų laipsnių. Atitinkamai padidėjo ir dujų slėgis. Tuo metu progalaktinio debesies didžioji dalis dar nebuvo suspėjusi virsti žvaigždėmis, debesis dar nebuvo nurimęs. Įkaitęs jis visas ėmė plėstis šimtų ar tūkstančių km/s greičiu.

Kuo didesnio tankio dujos buvo besiformuojančios galaktikos centrinėje dalyje prieš karštosios fazės pradžią, tuo dažniau ir arčiau viena kitos ten ėmė sproginėti supernovos, vadinasi, tuo labiau įkaito ir didesniu greičiu ėmė plėstis tokios galaktikos dujos. O jei savo dujas ypač labai įkaitinusi galaktika nebuvo pernelyg didelės masės (įskaitant ir nematomosios medžiagos masę), tai šitokios galaktikos gravitacinis laukas nepajėgė sulaikyti veržliai besiplečiančių dujų, ir jos visos išsisisklaidė po tarpgalaktinę erdvę. Taigi išsiveržė ypač galingas galaktikų vėjas. Savo vietose liko tik žvaigždės. Į jas spėjo susitraukti vos 1–10% pradinės dujų masės. Taip atsirado dE galaktikos.

Jei dujos buvo įkaitintos ne taip smarkiai, o besiformuojančios galaktikos gravitacinis laukas buvo pakankamai stiprus, tai jį įveikė ir išsisklaidė tik besiplečiančių dujų išorinė dalis. O centrinė jų dalis, ilgainiui šiek tiek ataušusi, stipriam gravitaciniam laukui nugalėti pritrūko kinetinės energijos ir vėl pradėjo trauktis.

Kaip žinoma, gravitaciniam laukui privertus dujas trauktis, mažėja jų gravitacinė energija (potencinės energijos rūšis) – ji darosi vis neigiamesnė. Dėl to turėtų didėti dujų šiluminė energija, kilti jų temperatūra. Antra vertus, didėjant dujų tankiui, jos ima stipriau spinduliuoti eikvodamos šiluminę energiją. Dėl to jų temperatūra turėtų kristi. Tad kuri tendencija nugali? Tai priklauso nuo konkretaus spinduliavimo mechanizmo, kuris savo ruožtu priklauso nuo temperatūros, tankio, cheminės sudėties ir kitų aplinkybių.

Besitraukiant karšto debesies centrinei sričiai, ten pradėjo vyrauti aušimo tendencija. Dujos pamažu atvėso. Ilgainiui jose vėl pradėjo formuotis žvaigždžių spiečiai ir pavienės žvaigždės. Taip baigėsi didžioji pertrauka.

O išoriniai karšto debesies sluoksniai taip ir nepradėjo trauktis. Išorinė jų dalis išsisklaidė tarpgalaktinėje erdvėje, o kita dalis, sulaikyta gravitacinio lauko, sudarė minėtąją karštų dujų aureolę – Rentgeno spindulius skleidžiantį plazmos vainiką. Jis ir dabar tebespinduliuoja iš lėto aušdamas – eikvodamas supernovų masinio sprogimo metu sukauptą šiluminę energiją.

Skaičiavimai rodo, kad mūsų Galaktikos dujų įkaitinimui galėjo prireikti maždaug milijardo supernovų. Jei tai tiesa, dėl šio įkaitimo Paukščių Tako

galaktika prarado maždaug pusę savo buvusios pirmykštės dujų masės. Atrodo, kad pačios masyviausios E galaktikos beveik nieko neprarado, išsaugojo beveik visas savo dujas. Tiesa, maždaug pusė jų nepateko į susidarančias žvaigždes ir sudarė jau minėtus karštos plazmos rentgeninius vainikus.

Tačiau stebėdami labai tolimas, iš gilios praeities matomas galaktikas mes bent kol kas neaptinkame tokio akivaizdaus jų šviesio padidėjimo, kuris atitiktų karštajai fazei sukelti reikalingą supernovų kiekį. Yra ir daugiau prieštaravimų šiai ne visų pripažįstamai hipotezei.

Po hipotetinės didžiosios pertraukos vėl pradėjusių trauktis dujų tankis pagaliau tiek padidėjo, kad pradėjo aiškėti judesio kiekio momento skirtumai. Besiformuojančiose elipsinėse galaktikose žvaigždės ir toliau susidarinėjo iš tokios difuzinės medžiagos, kuri iš lėto slinko galaktikos centro link. Tuo tarpu būsimosiose spiralinėse galaktikose dujos susitraukė į vis plonėjantį diską.

Ankstesnių, dar prieš didžiąją pertrauką vykusių susitraukimų metu dujų debesis buvo daug masyvesnis ir tankesnis. Todėl žvaigždės jame pradėjo formuotis gana anksti, dar mažai teišryškėjus sukimuisi apie ašį ir medžiagos koncentracijai į plokštumą. Vėl susitraukiant po laikino didelio išsiplėtimo, debesies masė buvo jau kur kas mažesnė. Juk viena buvusių dujų dalis tapo visų sferoido žvaigždžių statybine medžiaga, kita pateko į Rentgeno spindulius skleidžiantį plazmos vainiką, dar viena buvo greito išsiplėtimo ištaškyta po tarpgalaktinę erdvę. Be to, po didžiojo įkaitimo besitraukiančios dujos dar ilgą laiką išliko per karštos, kad susidarytų žvaigždės.

Dėl visų šių priežasčių po hipotetinės karštosios fazės naujas žvaigždėdaros etapas būsimosiose spiralinėse galaktikose labai vėlavo. Vėl masiškai gimti žvaigždės pradėjo tik tada, kai dujos pagaliau susirinko į diską, taigi labai išaugo jų tankis.

O besiformuojančiose elipsinėse galaktikose ši didžioji pertrauka tarp žvaigždėdaros etapų buvo kur kas trumpesnė – neišryškėjus progalaktinio debesies greitam sukimuisi apie ašį, dujos galėjo pakankamai trauktis ir ataušti daug greičiau negu būsimose spiralinėse galaktikose. Juk jos traukėsi ne į diską, o galaktikos centro link. Žvaigždėdarą visuose jos etapuose labai greitino ir stiprino dar ir ta aplinkybė, kad E galaktikų tankis visą jų evoliucijos laiką buvo daug didesnis negu spiralinių galaktikų.

Taigi būsimosiose spiralinėse galaktikose, išskyrus jų centrinius telkinius, didžioji pertrauka galėjo užtrukti net kelis milijardus metų. Pavyzdžiui, panašu, kad mūsų Galaktikoje ji tęsėsi apie 2 milijardus metų. Besiformuojančiose elipsinėse galaktikose ir būsimųjų spiralinių galaktikų centriniuose telkiniuose ji buvo, matyt, dvigubai ar trigubai trumpesnė. Tas pats ir iki didžiosios pertraukos. E galaktikose, ypač masyviosiose, žvaigždėdaros etapų tempai buvo daug spartesni, todėl didžioji pertrauka atėjo greičiau – po milijardo ar šiek tiek mažiau metų nuo pačių pirmųjų žvaigždžių gimimo. Tuo

tarpu būsimųjų spiralinių galaktikų sferoide ir centriniame telkinyje senųjų, antrosios populiacijos žvaigždžių susidarymas galbūt su 1 ar 2 pertraukėlėmis ar bent akivaizdesniais žvaigždėdaros susilpnėjimais dar iki didžiosios pertraukos tęsėsi 1–2 milijardus metų.

Iki didžiosios pertraukos formavosi vadinamosios nemetalingosios žvaigždės. Padažnėję supernovų sprogimai gebėjo dujas ne tik labai įkaitinti, sąlygodami hipotetinę didžiąją pertrauką žvaigždėdaroje, bet ir jas gerokai praturtinti už helį sunkesniais elementais. Tiesa, šis praturtinimas buvo labai nevienodo masto. Tose vietose, kur supernovos sproginėjo dažniau ir arčiau viena kitos, daugelio už helį sunkesnių elementų gausa pasidarė tokia pati arba tik šiek tiek mažesnė kaip Saulėje. O supernovų sprogimų mažiau paveiktose vietose ši gausa irgi išaugo, tačiau vis dėlto liko kelis ar keliolika kartų mažesnė negu Saulėje. Todėl po didžiosios pertraukos žvaigždės pradžioje ėmė susidaryti būdamos labai nevienodos cheminės sudėties. Ir tik ilgainiui, tęsiantis galaktikų cheminei evoliucijai, žvaigždžių statybinės medžiagos metalingumas visur pasidarė maždaug toks pat ar net didesnis kaip Saulėje.

Mūsų Galaktikos diske žvaigždės po didžiosios pertraukos vėl pradėjo formuotis maždaug prieš 9–11 milijardų metų. Tai vadinamojo ***storojo disko*** žvaigždės. Jų visuma sudaro apie 1,5 kpc storio diską. Tačiau ir šį kartą visos dujos nespėjo virsti žvaigždėmis. Matyt, vėl ėmė masiškai sproginėti supernovos, dar kartą šiek tiek įkaitindamos dujų likučius ir tuo būdu beveik pristabdydamos naujų žvaigždžių susidarymą.

Tiesa, storasis diskas dar per mažai ištirtas. Panašu, kad jame yra labai įvairaus amžiaus ir metalingumo žvaigždžių. Galbūt jis formavosi kaip tik tuo metu, kai, mūsų nuomone, buvo hipotetinė didžioji pertrauka, ir tuo būdu ją paneigia? Neabejojame, kad jo susidarymui didelės įtakos turėjo ir svetimų mažų galaktikų ar dujų debesų įkritimai.

Yra hipotezių, kurios teigia, kad stambios S galaktikos vis tik susidarė iš galaktikėlių grupių, kuomet gausūs supernovų sprogimai iš šių galaktikėlių išmetė beveik visas į žvaigždes dar nepatekusias dujas, o pastarosios dėl didelio judesio kiekio momento susirinko į vientisą diską galaktikėlių grupės centrinėje srityje. Tai ir buvo storojo disko formavimosi pradžia. O daugelis buvusių mažų galaktikėlių palaipsniui įkrito į besiformuojantį storąjį diską arba susibūrė į sferoidą aplink šį diską. Palaipsniui į mūsų Galaktiką įkris ir visos dar neįkritusios mūsų Galaktikos palydovės, tarp jų ir abi Magelano Debesų galaktikos.

8.7.8. Plonojo disko ir spiralinių vijų susidarymas

Paskutinysis žvaigždėdaros laikotarpis Paukščių Tako galaktikoje prasidėjo (iš pradžių ypač iš lėto) maždaug prieš 7–9 milijardus metų. Tada pradėjo formuotis vadinamojo ***plonojo disko*** žvaigždės.

Spiralinėse galaktikose šis paskutinysis žvaigždėdaros etapas užtruko ypač ilgai – iki pat mūsų dienų. Jam būdingas žvaigždžių statybinės medžiagos stygius, sąlygojantis žvaigždėdaros lėtumą. Juk iš buvusių dujų liko tik menki jų likučiai, kuriems palaipsniui pradėjo tikti tarpžvaigždinės medžiagos vardas. Šią tarpžvaigždinę medžiagą sudaro ne vien dujų likučiai. Tarp dujų prisimaišė ir mikroskopinių dulkelių, kurios pradėjo rastis tada, kai žvaigždžių gelmės prigamino pakankamai metalų ir kitų sunkesnių už helį elementų.

Dėl statybinės medžiagos stygiaus negalėjo labai įsismaginti žvaigždžių gimimo procesas, todėl šiame paskutiniajame žvaigždėdaros laikotarpyje niekada nebuvo tokios didelės supernovų sprogimų gausos, kuri būtų nutraukusi žvaigždėdarą. Tačiau būtų galima pagalvoti, kad žvaigždėdara vis tiek jau seniai turėjo nutrūkti, galutinai išsekus tarpžvaigždinės medžiagos ištekliams. Kaip tik dėl šios priežasties, matyt, jau keli milijardai metų beveik nebeatsiranda naujų žvaigždžių net ir tose elipsinėse galaktikose, kuriose žvaigždėdara užtruko ilgiausiai. Spiralinėse galaktikose dalį tarpžvaigždinės medžiagos iki mūsų dienų išsaugojo tarpžvaigždinis magnetinis laukas.

Besiformuojančios galaktikos dujų likučiams traukiantis į vis plonesnį diską, kartu buvo tempiamos ir vis labiau suspaudžiamos magnetinės linijos. Dėl to magnetinis laukas vis stiprėjo, kol pagaliau jo slėgis pasidarė pakankamai didelis ir sustabdė tolesnį disko plonėjimą. Magnetinio lauko slėgiui dar padeda kosminių spindulių dalelių slėgis. Tuo būdu magnetinis laukas ir kosminių spindulių dalelės neleido dujų diskui pernelyg suplonėti, sutankėti ir greitai virsti žvaigždėmis. Dėl to tarpžvaigždinės medžiagos likučiai išsilaikė iki mūsų dienų, ir mes turime galimybę stebėti žvaigždžių gimimo paslaptį.

Susiformavus žvaigždžių ir dujų mišinio diskui, per jį ėmė ristis sutankėjimo bangos. Juk greitas sukimasis sukuria Koriolio jėgą, suteikiančią diskui savotišką stangrumą, kuris būtinas, kad galėtų plisti tankio bangos. Kas gi sukelia šias tankio bangas? Greičiausiai nesimetriškas, kiek pailgos formos žvaigždžių pasiskirstymas netoli galaktikos centro. Besisukdamas apie savo trumpesniąją ašį, toks pailgas žvaigždžių telkinys sukuria sutankėjimo bangas ir priverčia jas suktis pastoviu kampiniu greičiu. Šitaip besisukdamos ir plisdamos tolyn nuo galaktikos centro, sutankėjimo bangos įgyja spiralinių vijų formą. Spiralinėse vijose padidėja žvaigždžių ir ypač tarpžvaigždinės medžiagos tankis. Dėl to ten formuojasi nauji difuziniai debesys.

Sutankėjimo bangas savo potvyniniu veikimu gali sukelti ir priartėjusi kaimyninė galaktika.

Atsiradus spiralinėms vijoms, per 1–3 milijardus metų susiformuoja ***skersė***, kuri stabilizuoja tankio bangas ir tuo būdu fiksuoja spiralinę struktūrą. Tačiau skersės padeda tarpžvaigždinei medžiagai iš tolimesnių sričių patekti į galaktikos centro aplinką. O kai čia susikaupia labai daug dujų ir dulkelių, pagreitėjusią žvaigždėdarą visuomet lydintys audringi įvykiai skersę gali sutrumpinti ar net visiškai suapvalinti. Ilgainiui gali vėl susidaryti nauja skersė. Galbūt tai gali kartotis net keletą kartų. Jei S galaktika turi labai masyvų sferoidą, tai šis trukdo atsirasti skersei, tačiau pats prisideda prie tankio bangų stabilizavimo.

Dėl didesnio medžiagos tankio spiralinėse vijose 5–10% padidėja gravitacinis potencialas. Todėl, įskriedama į spiralinę viją, tarpžvaigždinė medžiaga, taip pat ir žvaigždės įgyja papildomą 10–20 km/s greitį – įkrinta į negilią potencialinę duobę. Žvaigždžių judėjimas nuo to nedaug tepakinta.

O į spiralinę viją įlekiantys dujų debesys viršgarsiniu greičiu atsitrenkia į vijoje jau buvusius debesis. Dėl to atsiranda smūginės bangos suspausdamos vijoje atsidūrusią tarpžvaigždinę medžiagą. Gravitacijos jėga, magnetinis laukas ir smūginės bangos, taip pat ir debesų susidūrimai, jų susiliejimai sukuria sudėtingą tarpžvaigždinės medžiagos struktūrą spiralinėse vijose. Ten, be atskirų difuzinių debesų, susiburia ir milžiniški atominių dujų debesų konglomeratai, pavadinti ***superdebesimis***. Jų skersmenys siekia kelis šimtus ar net daugiau kaip tūkstantį parsekų, o masės – kelis ar keliolika milijonų Saulės masių. Tokiuose superdebesyse atsiranda daug didesnio tankio vietų, kur viename cm^3 prisikaupia šimtai dujų atomų, o kai kur – ir daug daugiau. Ten labai pagausėja ir mikroskopinių dulkelių, kurių paviršiuose arba jų priedangoje nuo ultravioletinių spindulių atomai jungiasi į molekules. Taip susidaro molekulinių debesų grupės, susijungusios į vadinamuosius ***didžiuosius molekulinius debesis*** (žr. **6.1.4.**). Jų masės – dešimtys ar šimtai tūkstančių Saulės masių, o kartais ir per $10^6\ M_{\odot}$, skersmenys – nuo 30 iki 100 pc ir daugiau.

Dalis molekulinių debesų nuo pat savo susidarymo pradžios atitinka Džinso nestabilumo kriterijų, vadinasi, neatsilaiko prieš savo paties gravitacijos jėgą ir iš lėto traukiasi. Jei niekas nesutrukdo ramios tokio debesies evoliucijos, ilgainiui jis virsta **kamuoliniu žvaigždžių spiečiumi**.

Tačiau spiralinėse galaktikose jaunų kamuolinių spiečių randame labai mažai. Pavyzdžiui, mūsų Galaktikoje žinome tik vieną tokį spiečių. Tikriausiai jų yra šiek tiek daugiau, tačiau tarpžvaigždinės dulkelės trukdo juos atrasti ir atpažinti. Didžiajame Andromedos Ūke rasta 15 jaunų kamuolinių spiečių. Netaisyklingosiose galaktikose jaunų kamuolinių spiečių dalis tarp visų rūšių žvaigždžių spiečių yra daug didesnė.

Tad kas dabartiniu metu trukdo spiralinėse galaktikose dideliems molekuliniams debesims virsti kamuoliniais spiečiais, nors kadaise, kol būsimosios spiralinės galaktikos dar neturėjo diskų, netrukdė? Ir antras klausimas: kuo dabar dažniausiai virsta didieji molekuliniai debesys?

Trukdo smūginės bangos, kurios spiralinėse vijose pasitaiko daug dažniau negu tarpuose tarp vijų arba Ir galaktikose. Smūgines bangas sukelia ir į spiralines vijas krintanti tarpžvaigždinė medžiaga, ir supernovų sprogimai, ir didelės masės jaunų labai karštų bei galingų žvaigždžių ypač stiprus vėjas ir greitos dujų čiurkšlės, trykštančios į dvi priešingas puses išilgai žvaigždės sukimosi ašies, ir gausių emisinių ūkų plėtimasis, ir debesų susidūrimai. Praeidama smūginė banga suspaudžia debesies medžiagą ir tuo būdu neretai priverstinai sukelia žvaigždėdarą. Dažnai tai atsitinka per anksti, kol dar visas debesis nebuvo pakankamai susitraukęs. O tai ir sutrukdo atsirasti kamuoliniam spiečiui.

Būtent iš Džinso nestabilumo kriterijaus išraiškos (**6.2**) matome, kad kuo mažesnis tarpžvaigždinės medžiagos tankis, tuo į masyvesnes žvaigždes ši medžiaga susitraukia. Formuojantis kamuoliniam spiečiui, pirmiausia gimsta mažų ir vidutinių masių žvaigždės. Ir tik vėliau, kai didelė statybinės medžiagos dalis jau patenka į žvaigždes ir dėl to dar likusi palaida medžiaga praretėja, ima gausiai rastis ir didelių masių žvaigždės. O prasidėjus priverstinei žvaigždėdarai, labai masyvios žvaigždės dažniausiai ima formuotis iš pat pradžių, kartu su mažesnių masių žvaigždėmis. Šios masyvios naujagimės labai greitai, tiesiog per milijonus metų savo sukeltomis smūginėmis bangomis ir labai gausiais ultravioletiniais spinduliais įkaitina ir išstumia į visas puses tolyn nuo prasidėjusios žvaigždėdaros vietos didelius kiekius tarpžvaigždinės medžiagos, kurios tik maža dalis tesuspėjo patekti į gimstančias žvaigždes. Dėl to žvaigždėdara toje vietoje nutrūksta.

Antra vertus, tos pačios masyvių naujagimių žvaigždžių sukeltos smūginės bangos, plisdamos per molekulinį debesį tolyn, sužadina žvaigždėdarą gretimose jo srityse. Tuo būdu priverstinės žvaigždėdaros banga, tarytum kokia ligos epidemija, palaipsniui plinta per visą molekulinį debesį. Tai trunka dešimtis milijonų metų. Tačiau žvaigždžių susidaro daug mažiau, negu dera kamuoliniam spiečiui. Juk dideli buvusio molekulinio debesies medžiagos kiekiai tampa išblaškyti. Jie ilgainiui susirenka į naujus debesis.

Taip vietoje vieno gausaus kamuolinio spiečiaus atsiranda viena ar kelios negausios visiškai jaunų, taip pat dar ir tebesiformuojančių žvaigždžių grupės, pavadintos **žvaigždžių asociacijomis**. Karštoms žvaigždėms išblaškius nemažą dalį tarpžvaigždinės medžiagos, susilpnėja asociacijos žvaigždžių ir tarpžvaigždinės medžiagos likučių tarpusavio trauka. Tokios sistemos bendra energija (teigiamos kinetinės ir neigiamos gravitacinės energijos suma) pasidaro teigiama. Dėl to asociacijos per dešimtis milijonų metų išsisklaido. Tačiau asociacijų viduje susidaro ir kompaktiškesnės, tarpusavio traukos jėgos surištos kelių dešimčių – kelių tūkstančių žvaigždžių grupės – **padrikieji žvaigždžių spiečiai**. Asociacijai išsisklaidžius, padrikieji spiečiai išlieka ilgesnį laiką.

Jei žvaigždėdarą sukeliančios smūginės bangos nusirita ne per vieną molekulinį debesį, o per visą jų grupę, susidaro ištisa asociacijų grupė – **super-**

asociacija. Ji ilgainiui tampa **žvaigždžių debesimi**, išsisklaidančiu tik per šimtus milijonų metų.

Matome, kad spiralinės vijos daug stipriau šviečia už tarpus tarp vijų ne tiek dėl žvaigždžių gausumo, kiek dėl to, kad ten yra daug žvaigždėdaros lizdų – asociacijų, kurių labai mažai tarpuose tarp vijų. Asociacijose yra O ir B spektrinių klasių pagrindinės sekos žvaigždžių bei supermilžinių, kurios ne tik pačios labai galingai spinduliuoja, bet ir sukuria emisinius ūkus. Tai ir išryškina spiralines vijas.

Tvarkingą, sutankėjimo bangų sukurtą spiralinių vijų vaizdą gali sugadinti net ir negausios superasociacijos, susidarančios tarpuose tarp spiralinių vijų. Dėl Galaktikos disko sukimosi greičio priklausomybės nuo nuotolio iki centro tokia superasociacija irgi ištempiama į laikiną spiralinės vijos pavidalo atkarpą. Daug tokių laikinų atkarpų galbūt ir nulemia labai netvarkingą sutrūkinėjusių vijų vaizdą Sc ir Sd galaktikose.

Molekulinių debesų su žvaigždėdaros lizdais yra ir netoli spiralinių galaktikų centrų.

8.7.9. Normalios cheminės sudėties žvaigždžių susidarymas centriniame telkinyje

Iki šiol kalbėjome tik apie spiralinių galaktikų disko evoliuciją. Tačiau į diską pateko tik tos dujos, kurios turėjo labai didelį judesio kiekio momentą. Dalis progalaktinio debesies dujų neturėjo didelio judesio kiekio momento arba jį prarado vėliau. Po didžiosios pertraukos, kuri nutraukė nemetalingųjų žvaigždžių gimimą, šitokios dujos susirinko į centrinį telkinį, kur iš jų jau ėmė formuotis normalios cheminės sudėties žvaigždės. Dabar jos čia nustelbia nemetalingąsias žvaigždes ir sudaro aiškią daugumą. Atrodo, kad kai kurios iš jų susidarė gerokai anksčiau už seniausias disko žvaigždes. Matyt, didžioji pertrauka centrinio telkinio dujoms buvo trumpesnė negu disko dujoms. Matome, kad spiralinių galaktikų centrinio telkinio raida daug kuo panaši į vidutinių ar didžiųjų elipsinių galaktikų raidą. Tačiau yra ir esminis skirtumas – centriniuose telkiniuse dar ir dabar tebėra daug tarpžvaigždinės medžiagos, ten, kaip ir spiralinėse vijose, tebevyksta žvaigždėdara. Matyt, centriniam telkiniui nuolat tiekia dujas diskas ir svetimų dujų debesų bei mažų galaktikų įkritimai. Žinoma, šios dujos pirmiausia turi prarasti judesio kiekio momentą. Žvaigždžių vėjo, supernovų sprogimų ir planetiškųjų ūkų po visą sferoido tūrį paskleistų dujų dalis irgi nusėda į galaktikų centrus.

9
SKYRIUS

MŪSŲ VISATOS RAIDA

Algimantas Ažusienis

9.1. METAGALAKTIKOS IR VISATOS SĄVOKOS

Visa mūsų stebėjimų priemonėmis prieinamų galaktikų visuma vadinama ***stebimąja Mūsų Visatos dalimi*** arba ***Metagalaktika***. Šiuolaikinės stebėjimų galimybės siekia 3–5 milijardus pc nuotolį. Jau matėme, kad visame šiame milžiniškame tūryje galaktikos ne tolygiai pasiskirsčiusios, o susibūrusios į įvairaus rango sistemas: dvinarių ar daugianarių galaktikų sistemas, galaktikų grupes, jų būrius, galaktikų spiečius, superspiečius. Tačiau šie netolygumai reikšmingi tik palyginti smulkiame mastelyje. Apžvelgiant nuotolius, didesnius kaip 100–300 Mpc, visur matyti panašios ir panašiai pasiskirsčiusios galaktikų sistemos. Niekur nesijaučia galaktikų visumos, kokios nors aukščiausio rango jų supersistemos centro ar pakraščių požymių. Taigi nagrinėjant stambiu masteliu, Metagalaktika yra **homogeniška**. Ji taip pat ir **izotropiška**, nes visomis kryptimis jos savybės vienodos, nėra kokių nors išskirtinių krypčių.

Šitoks homogeniškumas ir izotropiškumas leidžia manyti, kad Metagalaktika – tai tik maža dalelė kažkokios didžių didžiausios galaktikų ir tarpgalaktinės materijos supersistemos. Ši hipotetinė supersistema vadinama ***Mūsų Visata***. Galima spėti, kad ji yra baigtinė ir kad egzistuoja nepaprastai daug kitų visatų. Atskiros jų grupės gali būti bendros kilmės ir sudaryti aukštesnio rango sistemas. Kitos visatos gali būti labai įvairios, kai kurios ir visiškai nepanašios į Mūsų Visatą. Pavyzdžiui, kai kuriose visatose galbūt tėra arba vien tik vandenilis, arba vien tik superlengvasis helis (biprotonai $^{2}_{2}\mathrm{He}$), arba vien tik neutronai, arba vien tik leptonai bei fotonai. Galėtų būti ir visiškai kitokios, fizikams nežinomos dalelės, jų sąveikos bei laukai arba net visiškai kitokia nežinomos prigimties materija, kitokie fizikos dėsniai.

9.2. DIDŽIOJO SPROGIMO HIPOTEZĖ

Hablo dėsnis (**8.17**) (žr. **8.3.2** skirsnelį) rodo, kad galaktikų spiečiai ir grupės vieni nuo kitų nepaliaujamai tolsta, o šio tolimo greitis proporcingas jau esančiam tarp jų nuotoliui. Taigi kuo toliau vienas nuo kito du galaktikų spiečiai, tuo didesniu greičiu didėja atstumas tarp jų. Tačiau šiuos stebėjimus galima traktuoti ir kitaip: kuo didesniu greičiu vienas nuo kito tolsta bet kokie du Metagalaktikos objektai, tuo daugiau yra suspėjęs išaugti nuotolis tarp jų. Tai reiškia, kad Metagalaktika plečiasi taip, kaip plečiasi pripučiamo kamuolio vidus ir paviršius: bet kurioje kamuolio vietoje esačiam stebėtojui atrodo, kad visos kitos kamuolio vietos tolsta nuo jo į visas puses greičiu, proporcingu nuotoliui nuo stebėtojo. Šiandien žinomos tolimiausios galaktikos nuo mūsų tolsta greičiu, kuris siekia net 97% šviesos greičio.

Iš stebėjimų duomenų ir loginių samprotavimų nedarome išvados, kad šitaip plečiasi vien tik Metagalaktika arba kokia nors didesnė Mūsų Visatos dalis. Natūralu tikėtis, kad šitaip plečiasi visa Mūsų Visata. Taip pat nėra pagrindo manyti, kad Hablo konstantos dabartinė skaitinė vertė $H_0 = 70$ km·s^{-1}·Mpc^{-1} (žr. (**8.18**) galėtų priklausyti nuo vietos Mūsų Visatoje (išskyrus lokalinius nukrypimus nuo globalinės H vertės dėl artimiausiųjų superspiečių traukos).

Taigi kad ir kurioje Mūsų Visatos vietoje būtų stebėtojas, jis neišvengiamai turi pripažinti, kad visur galioja tas pats Hablo dėsnis. Iš šio dėsnio darome išvadą, kad Mūsų Visatoje visi nuotoliai nuo laiko priklauso vienodu santykiu. Pavyzdžiui, praeityje buvo momentas, kai visi nuotoliai buvo dvigubai mažesni negu dabar. Dar ankstesniu momentu jie buvo mažesni trigubai, kuriuo nors dar ankstesniu momentu – tūkstantį kartų ir t. t. Taip samprotaujant peršasi išvada, kad Mūsų Visata pradėjo didžiuliu greičiu plėstis iš taško arba bent iš labai mažo tūrio. Tai panašu į kolosalų sprogimą.

Hipotezę, kad Visatos pradžia buvo panaši į sprogimą, 1920 m. pirmasis paskelbė belgų kosmologas Žoržas Lemetras (*G. Lemaitre*). Tačiau tuo metu dar nebuvo žinomas Visatos plėtimosi faktas, dar tebevyravo nuomonė, kad Visata yra stacionari – nei plečiasi, nei traukiasi. Šios nuomonės įtakoje A. Einšteinas netgi buvo padaręs prielaidą, kad be gravitacijos Visatoje dar egzistuoja ir nežinomos prigimties ***antigravitacijos***, arba ***stūmos jėga***, kuri bet kuriame Visatos taške visiškai atsveria traukos jėgą ir dėl to Visata lieka statiška. Šią stūmos jėgą A. Einšteino 1917 m. sudarytose kosmologinių (žr. įvadą) modelių (Visatos charakteristikų) lygtyse (dar žr. **9.7.1** skirsnelį) išreiškia papildomas narys su specialiai parinkto didumo konstanta, žymima Λ ir vadinama ***kosmologine konstanta***. Tačiau 1922 m. rusų fizikas Aleksandras Fridmanas matematiškai įrodė, kad negalima sugalvoti tokios stūmos jėgos, kuri bet kuriame Visatos taške tiksliai ir stabiliai kompensuotų gravitacijos jėgą ir tuo būdu garantuotų Visatos stacionarumą. Visata turi arba plėstis

arba trauktis. Ir pagaliau 1929 m., A. Fridmanui jau mirus, buvo suformuluotas Hablo dėsnis. Hipotezė, kad Mūsų Visata prasidėjo sprogimu iš taško, tapo labai populiari, intensyviai nagrinėjama, detalizuojama ir tobulinama. Toks labai specifinis, dėl nežinomų priežasčių įvykęs neapsakomos galios hipotetinis sprogimas buvo pavadintas ***Didžiuoju Sprogimu***.

Vis dėlto neįmanoma suvokti, kaip Visatos raida galėjo prasidėti iš taško. Juk taško tūris lygus nuliui. Tuo atveju Visata savo gyvavimą turėjo pradėti būdama begalinio tankio. Tokia nesuprantama būsena pavadinta ***singuliarumo būsena*** (lot. *singularis* – atskiras, savotiškas, ypatingas), o taškas, iš kurio Visata pradėjo plėstis – ***singuliariniu tašku***.

Tačiau begalinio tankio materijos iš tikrųjų niekada negalėjo būti. Neatlaiko kritikos ir teiginys, kad Mūsų Visatos tūris jos plėtimosi pradžioje buvo lygus nuliui. Juk esant labai dideliam materijos tankiui, visiškai pakinta erdvės ir laiko savybės. Erdvė ir laikas darosi nebeišskiriami, tampa kažkokiu erdvėlaikiu, galbūt pasireiškia jo kvantinė prigimtis, tūrio sąvoka pakinta iš esmės. Taigi fizikos mokslui dar nežinoma, ką reiškia sąvokos „Visatos singuliarumo“ būsena ir „singuliarinis taškas“. Aišku, kad bendroji reliatyvumo teorija nepajėgia aprašyti Visatos būklės netoli singuliarumo būsenos. Reikia dar bendresnių fizikos teorijų, kurios intensyviai kuriamos.

Dar mėginama pasinaudoti vadinamuoju dimensijų metodu. Jis padeda bent labai apytiksliai apskaičiuoti kai kuriuos kritinius, lemiamus nagrinėjamos fizikinės sistemos parametrus, net nesukūrus tiriamojo proceso teorijos. Reikia pasitenkinti vien tik suvokimu, kurios fizikinės konstantos yra įtakingiausios tiriamajam procesui. Mūsų Visatos raidos pradžios atveju tokie lemiami dydžiai, matyt, yra kai kurie iš vadinamųjų ***Planko parametrų,*** dimensijų metodu M. Planko apskaičiuotų dar 1899 m. atitinkamai kombinuojant tris pagrindines fizikines konstantas – gravitacinę konstantą G, mažąją Planko konstantą $\hbar = h/2\pi$ ir šviesos greitį c. Būtent

Planko ilgis

$$l_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-35}\,\mathrm{m}, \qquad (9.1)$$

Planko laikas

$$t_{\mathrm{Pl}} = \frac{l_{\mathrm{Pl}}}{c} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \approx 5{,}36 \cdot 10^{-44}\,\mathrm{s} \approx 10^{-43}\,\mathrm{s}, \qquad (9.2)$$

Planko masė

$$m_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\frac{c\hbar}{G}} \approx 2{,}2 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{kg}, \qquad (9.3)$$

Planko tankis

$$\rho_{\mathrm{Pl}} = \frac{m_{\mathrm{Pl}}}{l_{\mathrm{Pl}}^3} = \frac{c^5}{G^2\hbar} \approx 5 \cdot 10^{96}\,\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3}, \qquad (9.4)$$

Planko energija (arba temperatūra)

$$E_{Pl} = \sqrt{\frac{c^5\hbar}{G}} \approx 10^{28}\,\text{eV (arba } 10^{32}\,\text{K).} \qquad (9.5)$$

Manoma, kad bent kai kurie iš čia surašytų Planko parametrų nusako Mūsų Visatos realią būklę jos raidos pradžioje. Pavyzdžiui, Visata galbūt pradėjo plėstis ne nuo nulinio tūrio, o nuo 10^{-35} m eilės matmenų. Panašiai jos tankio mažėjimas turbūt prasidėjo ne nuo begalinio tankio, o nuo 10^{97}–10^{96} kg·m^{-3}. Atkreipkime dėmesį į šitokio tankio fantastišką didumą. Juk visos Metagalaktikos masė „vos“ 10^{53} kg eilės.

Naudojantis kai kuriais fizikiniais modeliais, samprotaujama, kad Planko ilgis, matyt, apytiksliai nusako mažiausią galimą ilgį – ilgio kvantą (10^{-35} m), o Planko laikas – mažiausią galimą laiko porciją – laiko kvantą (10^{-44} ar 10^{-43} s).

9.3. MŪSŲ VISATOS TANKIS, FIZIKINIS VAKUUMAS, PLĖTIMOSI YPATYBĖS, ATEITIS

9.3.1. Kritinis tankis

Priėmus hipotezę, kad Mūsų Visata prasidėjo Didžiuoju Sprogimu, atrodė natūralu galvoti (nors vėliau paaiškėjo, jog, matyt, esama priešingai), kad Visatos struktūrą sąlygoja vien tik gravitacijos jėga, o jai priešingos hipotetinės antigravitacijos, arba stūmos jėgos, nėra, taigi Visata plečiasi vien tik iš inercijos. Vadinasi, gravitacijos jėgos veikiamas plėtimosi greitis turi mažėti. Iškilo klausimas, ar šis įsivaizduojamas plėtimosi greičio mažėjimas kažkada ateityje visiškai sustabdys plėtimąsi, ar priešingai – Mūsų Visata plėsis amžinai.

Atrodė, kad atsakymas turėtų priklausyti vien tik nuo kinetinės ir gravitacinės energijos balanso. Mūsų Visatai plečiantis, didėja ir gravitacijos jėgos sąlygota jos potencinė energija, vadinama **gravitacine energija E_g**. (Maksimali E_g vertė esti tuomet, kai visi sistemos nariai yra vienas nuo kito nutolę iki begalybės. Susitarta šią maksimalią E_g vertę prilyginti nuliui. Vadinasi, realiu baigtinių nuotolių atveju $E_g < 0$.) Jei be gravitacijos daugiau nėra jokių Visatos struktūrą reguliuojančių jėgų, E_g gali didėti vien tik mažėjančios Visatos plėtimosi kinetinės energijos E_k sąskaita. O šių abiejų energijų suma turi išlikti pastovi:

$$E_g + E_k = \text{const.} \qquad (9.6)$$

Šiuo atveju turi galioti kuris nors vienas iš šių Mūsų Visatos ateities variantų:

1. Jei $E_g + E_k = 0$, tai Mūsų Visata plečiasi **paraboliniu**, kitaip sakant,

pabėgimo greičiu, kuris per be galo ilgą laiką sumažės iki nulio, nes visa plėtimosi kinetinė energija pavirs potencine. Taigi plėtimasis yra amžinas.

2. Jei $E_g + E_k > 0$, tai Mūsų Visata plečiasi **hiperboliniu greičiu**, kuris yra daugiau ar mažiau didesnis už parabolinį. Plėtimasis irgi amžinas. Tik plėtimosi greičio vertė, laikui bėgant, asimptotiškai artės ne prie nulio, o prie pastovios, už nulį didesnės vertės.

3. Jei $E_g + E_k < 0$, tai vis lėtėjantis plėtimasis ilgainiui liausis, nes baigsis plėtimosi kinetinės energijos atsargos. Gravitacijos jėgos veikiama Mūsų Visata pradės trauktis – iš pradžių nepaprastai lėtai, o paskui vis greičiau ir greičiau. Per labai ilgą traukimosi laiką Mūsų Visatoje pasidarys labai karšta ir ankšta, labai išaugs Visatos tankis.

Matome, kad (**9.6**) lygybės galiojimo atveju (kai nėra stūmos jėgos), Mūsų Visatos ateitis priklauso nuo jos potencinės ir kinetinės energijos balanso. O kaip šį balansą apskaičiuoti? Visai paprastai, net netaikant bendrosios reliatyvumo teorijos, o tenkinantis vien Niutono mechanika.

Reikia parašyti parabolinio greičio išraišką atžvilgiu rutulio, kurio spindulys yra r, o masė M:

$$v_p = \sqrt{\frac{2GM}{r}} = \sqrt{\frac{8\pi G r^2 \rho}{3}}; \qquad (\mathbf{9.7})$$

čia G yra gravitacinė konstanta, ρ – vidutinis bendras visų materijos formų masės tankis rutulio viduje. Šį sąryšį galime pritaikyti ir Mūsų Visatai, bet kuriai jos vietai. Juk bendroji reliatyvumo teorija įrodo, kad aplink bet kokį sferinį paviršių simetriškai pasiskirsčiusi materija, užimanti ne tik baigtinį, bet net ir begalinį tūrį, nesukuria jokio gravitacinio lauko šio sferinio paviršiaus apgaubtame rutulyje. Vadinasi, rutulio paviršiuje esantį kūną veikia vien tik rutulio masės sukurtas gravitacinis laukas.

Taigi Mūsų Visata plečiasi paraboliniu greičiu tik tuo atveju, jei galioja (**9.6**) lygybė ir jei jos vidutinis bendras visų materijos formų masės tankis ρ_Σ turi tam tikrą konkrečią vertę ρ_{kr}, kurią apskaičiuosime iš (**9.7**), dar pasitelkdami ir Hablo dėsnį (**8.17**), nes jis leidžia plėtimosi greitį v pakeisti Hablo konstanta H:

$$\rho_{kr} = \frac{3H^2}{8\pi G}. \qquad (\mathbf{9.8})$$

Šitaip apskaičiuotas Mūsų Visatos vidutinis bendras visų materijos formų masės tankis vadinamas ***kritiniu tankiu***. Iš (**9.8**) matome, kad ρ_{kr} nepriklauso nuo besiplečiančio tūrio didumo ir vietos, o priklauso tiktai nuo Hablo konstantos, kuri yra vienoda visai Mūsų Visatai ir priklauso tik nuo laiko. Priėmę, kad šiuolaikinė H vertė $H_0 = 70$ km·s^{-1}·Mpc^{-1} (žr. (**8.19**)), gauname:

$$\rho_{kr0} = 10^{-26} \text{ kg·m}^{-3}. \qquad (\mathbf{9.9})$$

9.3.2. Realus įvairių materijos formų vidutinis tankis

O koks yra realus visų materijos formų bendras vidutinis masės tankis ρ_Σ? Šį tankį patogu išreikšti kritinio tankio vienetais. Kitaip sakant, patogu naudotis santykiu

$$\Omega = \frac{\rho_\Sigma}{\rho_{kr}}. \qquad (9.10)$$

Jei nebūtų stūmos jėgos, tai nelygybė $\Omega > 1$ reikštų, kad Mūsų Visatos tankis yra pakankamai didelis ir pajėgus ateityje Visatos plėtimąsi paversti susitraukimu, o jei $\Omega \leq 1$, tai Mūsų Visata plėsis amžinai. Tad ką gi rodo stebėjimų duomenys?

Visų galaktikose šviečiančių žvaigždžių ir ten esančios tarpžvaigždinės medžiagos vidutinį tankį bandoma nustatyti superspiečiuose sumuojant galaktikų mases ir jas dalijant iš superspiečių tūrių. Tačiau neįmanoma tiksliai įvertinti, kiek galėtų būti neįžiūrimų mažo skaisčio LSB galaktikų ir mažos masės nykštukinių galaktikėlių. Todėl šios medžiagos (ji neretai vadinama **„šviečiančiąja medžiaga“**) tankio vertė gaunama labai neapibrėžta, kažkur tarp $\mathbf{10^{-29}}$ **ir** $\mathbf{10^{-27}\ kg{\cdot}m^{-3}}$. Šį tankį turėtų bent šiek tiek padidinti, o gal ir padvigubinti didžiulėse erdvėse tarp galaktikų pasklidusios labai išretėjusios dujos, o gal ir didesnio tankio pavieniai dujų debesys. Tačiau žvaigždžių medžiaga ir tarpžvaigždinė bei tarpgalaktinė medžiaga, kaip prisimename iš 8–jo skyriaus, tesudaro tik apie 10% galaktikų superspiečių masės. 90% galaktikų superspiečių masės turėtų tekti vadinamajai **nematomajai medžiagai**, kuri, matyt, yra keleriopos visiškai skirtingos prigimties. Tai ir **barioninė medžiaga** (įvairiausi už žvaigždes mažiau masyvūs kūnai, dėl savo masės mažumo nešviečiantys arba beveik nešviečiantys, jų atomų branduoliai sudaryti iš nukleonų (protonų ir neutronų), taigi iš barionų), ir **reliktiniai neutrinai** (žr. **9.7.7** skirsnelį), ir hipotetinės **silpnai sąveikaujančios** galbūt labai gausios palyginti **masyvios**, tačiau dar neaptiktos **elementariosios dalelės (WIMP'ai)**, ir hipotetinės **kosmologinės stygos**, **sienos** bei kiti **topologiniai defektai**, jeigu jie dar išliko iki mūsų dienų (žr. **9.7.2** skirsnelį). (Kosmologinių stygų ir kitų topologinių defektų materija turi masę ir energiją, sukuria gravitacinį lauką, tačiau, griežtai kalbant, vargu ar ją galima vadinti medžiaga, prie medžiagos šiuo atveju ji priskirta tik sąlyginai.)

Čia iškyla du klausimai: 1) koks vidutinis visos šios nematomosios medžiagos ir jos atskirų komponentų tankis 2) ar medžiaga sudaro pagrindinę Mūsų Visatos visos materijos dalį – gal, be medžiagos, Mūsų Visatoje dar esama labai daug kažkokios kitokios materijos?

Į šiuos klausimus bandoma atsakyti analizuojant įvairius Mūsų Visatos kilmės ir evoliucijos teorinius modelius, kurie kiek tik įmanoma pagrindžiami

ir tikrinami stebėjimų duomenimis. O stebėjimų duomenis galima šitaip sugrupuoti:

1) žvaigždžių ir tarpžvaigždinės bei tarpgalaktinės medžiagos cheminė sudėtis,

2) žvaigždžių, galaktikų ir jų sistemų duomenys,

3) Mūsų Visatos stebimosios dalies plėtimasis ir jo pobūdis,

4) Mūsų Visatos stebimosios dalies tankio duomenys,

5) vadinamųjų reliktinių fotonų (žr. **9.7.8** ir **9.9** skirsnelius) buvimas ir jų charakteristikos.

Peržiūrėjus daugelio mokslininkų grupių pateiktus analizės rezultatus, susidaro įspūdis, kad labiausiai tikėtinomis reikėtų laikyti šias apytiksles vertes: **visos barioninės** (ir šviečiančiosios, ir nematomosios) **medžiagos** šiuolaikinis vidutinis tankis $\rho_{\mathbf{bar0}} \approx \mathbf{4 \cdot 10^{-28}\ kg \cdot m^{-3}}$ arba kritinio tankio vienetais $\Omega_{\mathbf{bar0}} \approx \mathbf{0{,}04}$, o **nebarioninės nematomosios medžiagos** (reliktinių neutrinų, silpnai sąveikaujančių masyvių elementariųjų dalelių ir kt.) šiuolaikinis vidutinis tankis $\rho_{\mathrm{v}\mathbf{0}} \approx \mathbf{3 \cdot 10^{-27}\ kg \cdot m^{-3}}$, arba $\Omega_{\mathrm{v}\mathbf{0}} \approx \mathbf{0{,}3}$. Išeitų, kad visos medžiagos šiuolaikinis vidutinis tankis $\rho_{\mathrm{m0}} = \rho_{\mathrm{v0}} + \rho_{\mathrm{bar0}}$ net tris kartus mažesnis už ρ_{kr0}. Juk $\mathbf{\Omega_{m0} = \Omega_{v0} + \Omega_{bar0} \approx 0{,}34}$. Tuo tarpu visų materijos formų bendras vidutinis masės tankis ρ_{Σ} turėtų sutapti su ρ_{kr}. Apie tai dar pakalbėsime **9.7.2** ir **9.9.6** skirsneliuose. Taigi vyrauja nuomonė, kad $\mathbf{\Omega = 1}$. Jei taip yra iš tikrųjų, tai medžiaga tesudaro vos 1/3 visos Mūsų Visatos materijos. Reliktinių fotonų indėlis į materijos balansą visiškai nedidelis, nes šiuolaikinis jų masės tankis, kaip matome iš formulės (**9.52**), $\rho_{\mathrm{f0}} = 4{,}661 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$. Kitokių, galaktikose pagamintų fotonų bendra masė taip pat visiškai maža. Tai tinka ir magnetiniam bei elektriniam laukams. Radosi tarytum prieštaravimas: be medžiagos (ir nematomosios, ir matomosios) Mūsų Visatoje daugiau nieko pakankamai masyvaus arba turinčio pakankamai daug energijos mes neaptinkame, o medžiagos masės tankis tesudaro vos 1/3 Mūsų Visatos visos materijos masės tankio. (Nereikia užmiršti, kad bet kokios formos materijai tarp jos energijos tankio ε ir masės tankio ρ galioja A. Einšteino sąryšis $\varepsilon = \rho c^2$.) Išeitų, kad 2/3 Mūsų Visatos materijos yra kažkokios dar kitokios, galbūt kol kas visiškai nežinomos formos.

Atrodė, kad Mūsų Visatai tinka kažkuris vienas iš pateikiamų trijų galimų atvejų:

1) Medžiaga sudaro pagrindinę Mūsų Visatos materijos dalį, tačiau mes labai klystame įvertindami jos tankį – jis kelis kartus didesnis negu įvertinome. Tuomet praktiškai vien medžiagos užtenka, kad būtų $\Omega = 1$ (Mūsų Visata plečiasi paraboliškai, taigi amžinai) arba net $\Omega > 1$ (vis lėtėjantis plėtimasis ilgainiui pasikeis į vis greitėjantį susitraukimą).

2) Mūsų žinios apie nedidelį medžiagos masės tankį ($\Omega_{\mathrm{m0}} \approx 0{,}34$) yra artimos tikrovei, tačiau mes klystame samprotaudami, kad $\Omega = 1$. Tikrovėje, be medžiagos, dar kažkokios kitokios materijos didelių kiekių Mūsų Visatoje

praktiškai nėra, todėl $\Omega < 1$. Mūsų Visata plečiasi hiperboliškai ir plėsis amžinai.

3) Atitinka tikrovę palaipsniui susiformavęs suvokimas, kad $\Omega_{m0} \approx (0,3 \div 0,4)$ ir $\Omega = 1$, o trūkstamus $(60 \div 70)\%$ sudaro ne medžiaga, ne fotonai, pagaliau ne magnetiniai ar elektriniai laukai, o dar kažkokios kitokios formos materija, kurią dar reikės pažinti.

Ši trečioji alternatyva pamažu ėmė darytis vyraujanti, pripažįstama daugumos kosmologijos specialistų. Pasidarė labai aktualu suvokti šios neapčiuopiamos, tačiau Mūsų Visatoje vyraujančios materijos prigimtį. Gal ši materija nėra vieninga, o susideda iš kelių visiškai skirtingų komponentų? Gal bent kai kurie jos komponentai net neprisideda prie gravitacijos jėgos sukūrimo, o atvirkščiai – sukuria ne traukos, o stūmos, kitaip sakant, antigravitacijos jėgą?

9.3.3. Fizikinis vakuumas

Pastarasis klausimas nebuvo visiškai netikėtas. Prisiminkime (žr. **9.2** poskyrį), kad A. Einšteinas stūmos jėgos idėją iškėlė dar 1917 m. Tiesa, paskelbus Hablo dėsnį (**8.17**), jis šią idėją pavadino didžiausia savo gyvenimo klaida. Tačiau džinas iš butelio jau buvo paleistas – visais vėlesniais laikais vis atsirasdavo kosmologijos specialistų, bandančių kurti Visatos raidos modelius, pripažįstančius ir galimą stūmos jėgą.

Apie materiją, galinčią sukurti antigravitacijos jėgą, teorinės fizikos specialistai šiek tiek išsamiau pradėjo kalbėti XX a. antrojoje pusėje, ypač septintajame dešimtmetyje. Tai ***fizikinio vakuumo*** komponentas – ***virtualiosios dalelės***. Atrodo, kad yra ir kitokių fizikinio vakuumo komponentų. Galbūt esama ir dar kažkokios kitos, fizikams kol kas visiškai nežinomos materijos. Vieni autoriai fizikinį vakuumą linkę laikyti visiškai naujos, trečiosios formos materija, kiti teigia, kad tai tiesiog ypatingi fizikiniai laukai. Fizikiniam vakuumui priklausantis virtualiųjų bozonų kondensatas realias daleles stengiasi ne išstumti, kaip paprastos dujos, o įtraukti į save, taigi sukuria įtempimą – **neigiamą slėgį**. Panašus įtempimas atsiranda ir stengiantis ištempti kietą kūną arba skysčio paviršiui sąveikaujant su indo sienelėmis. Taip galėtų būti ir paprastose dujose, jeigu veiktų pakankamai stipri sąveikos jėga, traukianti dujų atomus ar molekules vienus prie kitų. Jei ši sąveika būtų didesnė už dujų dalelių chaotiško blaškymosi kinetinės energijos sukurtą teigiamą slėgį, atsiradęs neigiamas slėgis tokių dujų pripildytą balioną ne išpūstų, o sutrauktų. Taigi fizikos mokslas pripažįsta neigiamo slėgio egzistavimo galimybę. Tuo tarpu bendroji reliatyvumo teorija teigia, kad gravitacijos jėgą sukuria ne tik medžiaga, bet ir kitokia materija, taip pat ir teigiamas slėgis. **O jei slėgis yra neigiamas, tai jis sukuria ne traukos, o stūmos jėgą.**

Bet kurioje besiplečiančios Mūsų Visatos vietoje išskirkime rutulį, kurio spindulys yra r, materijos masės tankis ρ, o slėgis p. Remdamiesi Niutono

mechanika, apskaičiuojame gravitacinį pagreitį, kuris lėtina rutulio plėtimosi greitį:

$$a = -\frac{4}{3}\pi G\rho r\,. \qquad (\mathbf{9.11})$$

Tačiau, jei egzistuoja dar ir slėgis p, bendroji reliatyvumo teorija pateikia patikslintą gravitacinio pagreičio išraišką:

$$a = -\frac{4}{3}\pi G(\rho + 3\frac{p}{c^2})r\,. \qquad (\mathbf{9.12})$$

Čia G yra gravitacijos konstanta, c – šviesos greitis.

Taigi, jei Mūsų Visatoje būtų labai didelis slėgis, sukurdamas papildomą gravitacijos jėgą, jis prisidėtų prie Visatos plėtimosi stabdymo. Ir atvirkščiai – neigiamas slėgis, sukurdamas antigravitacijos, arba stūmos, jėgą, privalo Visatos plėtimąsi greitinti arba bent priešintis jos plėtimosi lėtinimui.

Iš pirmo žvilgsnio gali atrodyti, kad šis samprotavimas yra visiškai paradoksalus, tarytum prieštaraujantis kasdieninei patirčiai. Pavyzdžiui, gali atrodyti, kad Saulės viduje viešpataujantis slėgis sukuria ne traukos, o stūmos jėgą, kuri atsveria gravitacijos jėgą ir neleidžia Saulei sugniužti, susitraukti į juodąją bedugnę. Tačiau tikrovėje yra ne taip. Stūmos jėgą, kuri stengiasi Saulę išplėsti ir tuo būdu atsveria gravitacijos jėgą, sukuria ne pats teigiamas slėgis, o slėgio gradientas (kuo giliau, tuo slėgis didesnis). Pats teigiamas slėgis veikia priešingai negu jo gradientas – sukurdamas papildomą traukos jėgą, teigiamas slėgis prisideda prie pastangų Saulę sugniuždyti. Tačiau šios papildomos pastangos visiškai silpnutės, tiesiog nepastebimos. Tai rodo (**9.12**) sąryšis – Saulės atveju skliausteliuose esantis antrasis dėmuo gali būti atmestas, nes $p/\rho c^2 \approx 10^{-5}$. Šis antrasis dėmuo buvo reikšmingas tik labai ankstyvoje, daugelio milijardų laipsnių karščio Visatoje, kuomet medžiagos dalelių šiluminio blaškymosi greičiai buvo artimi šviesos greičiui. Ribiniu atveju, kai dalelių blaškymosi greičiai prilygsta šviesos greičiui, $p = 1/3\ \rho c^2$. Tas pats sąryšis tinka ir fotoninėms dujoms.

Bendrą Mūsų Visatos visų formų materiją, kurios vidutinį tankį jau žymėjome ρ_Σ, išskirkime į dvi dalis – materiją, kuri sukelia teigiamą slėgį (jos tankis ρ_t, slėgis p_t), ir materiją, kuri sukelia neigiamą slėgį (jos tankis ρ_Λ, slėgis p_Λ). Atitinkamai Visatos plėtimosi pagreitis a (žr. (**9.12**)) suskyla į du komponentus:

$$a_t = -\frac{4}{3}\pi G(\rho_t + 3\frac{p_t}{c^2})r\,, \qquad (\mathbf{9.13})$$

$$a_\Lambda = -\frac{4}{3}\pi G(\rho_\Lambda + 3\frac{p_\Lambda}{c^2})r\,. \qquad (\mathbf{9.14})$$

Skaitytojas turbūt jau suvokė, kad šiuolaikinėje Mūsų Visatoje medžiagos sukelto teigiamo slėgio praktiškai nėra. Fotonų ir dar kitokios materijos su-

keltas teigiamas slėgis irgi visiškai menkas dėl mažo jų masės tankio. Galbūt visiškai mažas tankis ir tokios fizikinio vakuumo materijos, kuri sukeltų teigiamą slėgį. O gal fizikinio vakuumo tokio komponento ir iš viso nėra. Matyt, galima laikyti, kad šiuolaikinėje Mūsų Visatoje $p_t \approx 0$. Vadinasi, traukos pagreitį a_t (žr. (**9.13**)) sukuria praktiškai vien tik medžiaga:

$$a_t \approx a_m = -\frac{4}{3}\pi G \rho_m r = -G\frac{M_m}{r^2}. \qquad (9.15)$$

(**9.15**) sąryšyje medžiagos masės tankį ρ_m pakeitėme į medžiagos masę M_m, norėdami priminti, kad medžiagos telkinių sukurta gravitacijos jėga yra atvirkščiai proporcinga nuotolio kvadratui ir dėl to, galaktikų sistemoms tolstant viena nuo kitos, jų tarpusavio trauka, tuo pačiu ir Visatos plėtimosi lėtėjimo pagreitis a_m turėtų mažėti.

Vyrauja nuomonė, kad pagrindiniai fizikinio vakuumo materijos komponentai sukelia neigiamą slėgį, kuris, matyt, šitaip priklauso nuo šios materijos masės tankio ρ_Λ:

$$p_\Lambda = -\rho_\Lambda c^2. \qquad (9.16)$$

Materija, kuriai galioja (**9.14**) ir (**9.16**) sąryšiai, yra savotiškai paradoksali – ji duoda teigiamą indėlį į Mūsų Visatos vidutinį tankį, tuo pačiu ji duoda teigiamą indėlį ir į gravitaciją, tačiau kartu, sukeldama neigiamą slėgį, ji duoda net tris kartus didesnį neigiamą indėlį į gravitaciją. Taip atsiranda stūmos jėga. Tai matosi sugretinus (**9.14**) ir (**9.16**). Šių abiejų sąryšių sujungimo rezultatas – teigiamas, stūmos jėgos sukurtas pagreitis

$$a_\Lambda = \frac{8\pi G \rho_\Lambda}{3} r. \qquad (9.17)$$

Šis teigiamas pagreitis turėtų konkuruoti su medžiagos traukos jėgos sukurtu neigiamu pagreičiu a_m (žr. (**9.15**)).

Matome, kad fizikinio vakuumo sukuriama stūmos jėga yra labai savita ir universali. Ji priklauso nuo sugebančios sukelti neigiamą slėgį materijos energijos arba masės tankio ir yra tiesiog proporcinga (ne atvirkščiai, o tiesiog!) nuotoliui. Daugiau nuo nieko ji nepriklauso. Vien šios jėgos veikiami bet kokie du Mūsų Visatos taškai turėtų tolti vienas nuo kito vis didėjančiu greičiu ir net įgydami vis didėjantį teigiamą pagreitį.

Tačiau galbūt šiuolaikinėje Mūsų Visatoje stūmos jėgą sukuriančios materijos nėra arba jos tankis visiškai mažas? Tuomet nebūtų ir (**9.17**) pagreičio arba jį, kaip visiškai mažą ir nustelbtą (**9.15**) pagreičio, būtų galima atmesti.

Kas kita ankstyvojoje Visatos kūdikystėje. XX a. devintajame dešimtmetyje buvo sukurtas vadinamasis **infliacinės Visatos modelis**, teigiantis buvus tokį labai trumputį laikotarpį, pavadintą ***infliacijos era***, kuomet didžiulio tankio fizikinio vakuumo materija, kai kurių kosmologijos specialistų vadinama ***inflantonu***, sukūrė neįsivaizduojamai didelę stūmos jėgą, staigiai išplėtusią

besiformuojančią Mūsų Visatą iki kolosalių matmenų. (Plačiau apie tai bus **9.7.3** skirsnelyje) .

O baigiantis infliacijos erai, stūmos jėgą sukuriančios materijos tankis galbūt nukrito beveik iki nulio, ir Visata, infliacijos eroje pasiekusi didžiulį plėtimosi greitį, toliau ėmė plėstis lėtėjančiu greičiu, beveik vien tik iš inercijos? Tačiau šitaip galvojant išlieka visiškai neapčiuopiama ir nesuprantama ta materija, kurios trūksta, kad būtų $\Omega = 1$.

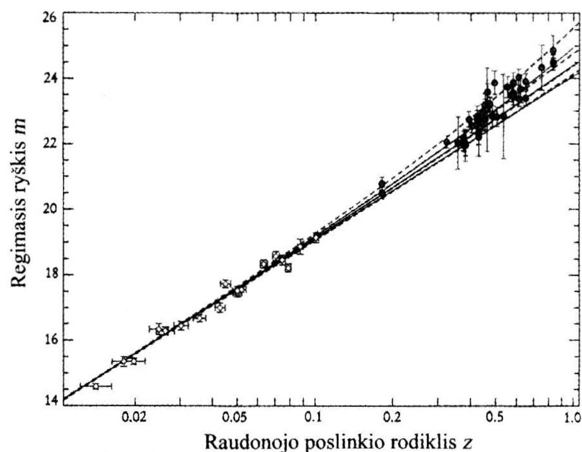
Taip palaipsniui ėmė stiprėti įtarimas, kad stūmos jėgą sukuriančios materijos Mūsų Visatoje nėra mažai. Jos tankis turėtų netgi pralenkti medžiagos tankį. Vadinasi, stūmos pagreitis (**9.17**) neturėtų būti nesusekamai mažas. Atvirkščiai, jis galbūt net nurungia traukos pagreitį (**9.15**). Pasidarė labai aktualu sugalvoti ir atlikti tokius stebėjimus, kurie leistų suvokti, kaip ilgainiui keitėsi Mūsų Visatos plėtimosi greitis, kitaip sakant, kaip nuo laiko priklauso Hablo konstantos H vertė. Apie tokių stebėjimų pirminius rezultatus kalbėsime **9.3.4** skirsnelyje.

9.3.4. Kaip plečiasi Mūsų Visata?

Dvi astronomų grupės (iš JAV, vadovaujama Saul'o Perlmutter'o ir iš Australijos, vadovaujama Brian'o Schmidt'o) nuo 1998 m. pradėjo skelbti labai tolimose galaktikose rastų Ia tipo supernovų stebėjimų rezultatus, kurie leidžia daryti sensacingą išvadą, kad Mūsų Visata paskutiniuosius 7 ar 8 milijardus metų plečiasi ne lėtėdama, kaip buvo įprasta manyti, o greitėdama. O prieš 9 ar 10 milijardų metų, atrodo, ji plėtėsi lėtėdama.

Kaip prisimename iš 5-jo skyriaus, visos Ia tipo supernovos sprogsta gana vienodai. Jų visų šviesis (spinduliavimo galia) pasiekia praktiškai vienodą lygį maksimumo metu, o vėliau vėlgi gana vienodu būdu silpsta. Vadinasi, joms galima pakankamai patikimai priskirti absoliutinį ryškį ir jį gretinti su išmatuotu regimuoju ryškiu. Toks gretinimas, panaudojus (**8.23**) sąryšį, pateikia supernovos nuotolį. Labai didelis Ia tipo supernovų šviesis ir Hablo kosminis teleskopas bei nauji galingesni antžeminiai teleskopai leidžia regimuosius ryškius m ir raudonojo poslinkio rodiklius z išmatuoti iki ankščiau neįmanomų tolybių – net iki $(3{\div}4)\cdot 10^9$ pc. Turint nuotolius r ir rodiklius z, pasinaudojus Hablo dėsniu ((**8.15**) ir (**8.17**) sąryšiais), jau galima bandyti apskaičiuoti, kokios Hablo konstantos H vertės buvo tolimoje praeityje, kaip jos priklausė nuo laiko. Juk supernovos jau matomos iš labai gilios praeities, siekiančios net daugiau nei 10 milijardų metų.

Tačiau detaliam ir patikimam H priklausomybės nuo laiko nustatymui reikėtų bent kelių tūkstančių Ia tipo supernovų, sprogusių įvairiausio nuotolio galaktikose. O jų rasta ir išmatuota vos per šimtą. Ypač mažai rasta pačių tolimiausiųjų supernovų.



9.1 pav. *Viena pirmųjų iliustracijų, teigiančių, kad Mūsų Visata plečiasi greitėdama. Tai S. Perlmutero ir B. Šmidto grupių Ia tipo supernovų stebėjimų rezultatai, paskelbti 1998 m. Didėjant nuotoliui, z vertės darosi per mažos (taškai nukrypsta į kairę), o tai reiškia, kad Hablo konstantos H vertė vidutinio senumo praeityje buvo mažesnė, vadinasi, dabar Mūsų Visata plečiasi greitėdama. Šią sensacingą išvadą patvirtino ir vėlesni tyrimai. Tačiau iškyla ir rimtų abejonių. Dėl šios išvados vis dar tebesiginčijama*

Todėl gauti duomenys nėra pakankamai tikslūs ir išsamūs. Jie tik rodo, kad stebint vis tolimesnes supernovas, tai yra einant į vis gilesnę praeitį, apskaičiuojama vis mažesnė H vertė, kol maždaug 7 ar 8 milijardų metų praeityje ji pasiekia minimumą. Vadinasi, tuomet Mūsų Visata plėtėsi lėčiausiai. O stebint dar tolimesnes supernovas, H vertė vėl gaunama didesnė.

Taigi Ia tipo supernovų stebėjimai rodo, kad Mūsų Visata dabar plečiasi greitėdama. Tačiau ar galima šių stebėjimų išvadomis tikėti? Galbūt Ia tipo supernovos nėra jau tokios vienodos? Gal jas dar reikia suskaldyti į kelis potipius? Ar mes pakankamai atsižvelgiame į galimus supernovų skirtumus, joms susiformavus skirtingu laiku iš galbūt skirtingos cheminės sudėties difuzinės medžiagos? Pagaliau ar mes pakankamai atsižvelgiame į galimą tarpžvaigždinę ekstinkciją ne tik Paukščių Tako galaktikoje, bet ir tose tolimose galaktikose, kuriose randamos supernovos? Buvo kruopščiai išnagrinėti visi galimi atsakymai į šiuos klausimus. Prieita išvados, kad nepaisant kai kurių liekančių abejonių, labiau tikėtina, kad Mūsų Visata vis tik dabar plečiasi greitėdama.

Tokia atrodytų netikėta, tiesiog stulbinanti išvada iš tikrųjų nebuvo visiškai netikėta. Juk jau buvo pradėjusi vyrauti nuomonė, kad medžiaga tesudaro 1/3 Mūsų Visatos materijos, o 2/3 materijos yra visiškai kitokios prigimties (žr. **9.3.2** ir **9.3.3** skirsnelius). Gal tai fizikinis vakuumas, apie kurį jau buvo pradėję rimtai kalbėti teorinės fizikos specialistai.

Tuo būdu 1998 m. paskelbta preliminarinė išvada, kad Mūsų Visata dabar

plečiasi ne lėtėdama, o greitėdama, (jos pagreitis ne neigiamas, o teigiamas), buvo priimta palyginti palankiai. Kai kurie mokslininkai netgi teigia, kad tai buvo pats didžiausias tų metų visos žmonijos atradimas. Kiti teigia, kad tai buvo didžiausias atradimas visame astronomijos moksle nuo 1929 m., kuomet E. Hablas paskelbė vėliau jo vardu pavadintą Mūsų Visatos plėtimosi dėsnį (**8.17**).

Iš supernovų stebėjimų nustatyti Hablo konstantos didėjimo duomenys kaip tik ir padėjo patikslinti **9.3.2** skirsnelyje pateiktus Mūsų Visatos įvairių formų materijos šiuolaikinio tankio duomenis. Tad pakartosime, kokios vidutinės šiuolaikinio tankio vertės dabar laikomos labiausiai tikėtinomis: barioninės medžiagos

$$\Omega_{bar0} \approx 0{,}04, \quad (\mathbf{9.18})$$

nebarioninės medžiagos

$$\Omega_{\nu 0} \approx 0{,}3 \quad (\mathbf{9.19})$$

ir stūmos jėgą sukuriančio fizikinio vakuumo

$$\Omega_{\Lambda} \approx 0{,}66. \quad (\mathbf{9.20})$$

Taigi stūmos jėgą sukuriančios vakuuminės materijos tankis šiandien maždaug dvigubai didesnis nei traukos jėgą sukuriančios materijos, faktiškai medžiagos tankis. Jei tai tiesa, Mūsų Visata turėtų vis greitėdama plėstis amžinai. O tolimoje praeityje, atrodo, ji plėtėsi kitaip.

Trumpučiukės infliacijos eros (žr. **9.7** poskyrį) metu ji plėtėsi su fantastiškai dideliu teigiamu pagreičiu, net visiškai gretimi, pavyzdžiui, vos atometriniais ar dar daug mažesniais nuotoliais perskirti besikuriančios Mūsų Visatos taškai vienas nuo kito ėmė tolti beveik šviesos greičiu. Gal tai ir buvo pradinis impulsas Mūsų Visatai plėstis?

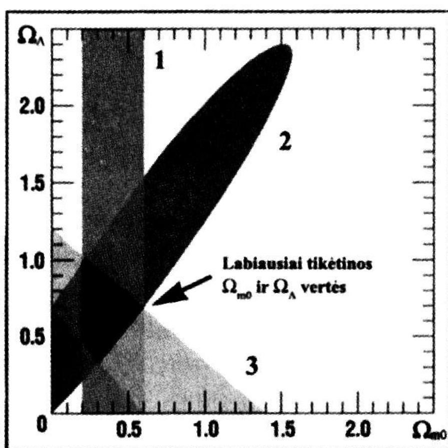
Infliacijos era tuojau pat (pagal vienus modelius po 10^{-32} s, o pagal kitus modelius vos po 10^{-35} s) ir baigėsi, nes esmingai sumažėjo buvęs kolosalus fizikinio vakuumo materijos tankis, tuo pačiu ir stūmos jėga. Vietoj vakuuminės, stūmos jėgą sukuriančios materijos atsirado labai didelio tankio kitokia materija, sukurianti traukos jėgą. Ši materija labai greitai, įvykus porai fazinių virsmų, išsiskyrė į medžiagą ir fotonus (žr. **9.7.3** ir **9.7.4** skirsnelius). Labai nusilpusi stūmos jėga pasidarė visiškai nustelbta atsiradusios didžiulės traukos jėgos. Mūsų Visata ėmė plėstis lėtėdama, beveik vien tik iš inercijos.

Laikui bėgant, medžiagos ir fotonų tankis mažėjo, traukos jėga silpo. O stūmos jėga turbūt stiprėjo. Maždaug per 6–9 milijardus metų šios abi priešingos jėgos pagaliau susilygino, Mūsų Visatos plėtimosi greitis nustojo mažėti, pasiekė savo minimumą.

O dar vėliau jau stūmos jėga pasidarė vis labiau vyraujanti. Nuo to laiko Mūsų Visata ėmė plėstis vis labiau greitėdama ir, matyt, taip plėsis amžinai. Jei tai tiesa, Mūsų Visatos kinetinės ir gravitacinės energijų suma negali bū-

ti pastovi, ji turėtų visą laiką didėti. Taigi būdu (9.6) prielaida ir iš jos daromos išvados negalioja.

Tačiau šie sensacingi teiginiai dar nėra pakankamai patikimi. Visų pirma, kaip jau minėjome, yra abejonių dėl supernovų metodo patikimumo nustatant Hablo konstantos priklausomybę nuo laiko. Antra vertus, teorinė fizika dar per mažai žino apie fizikinį vakuumą. Galbūt esama daug įvairių jo komponentų su visiškai skirtingomis savybėmis. Vien virtualiųjų dalelių galima įvairovė tiesiog neaprėpiama. Kai kurie fizikinio vakuumo komponentai galėtų sukurti ne stūmos, o traukos jėgą. Pavyzdžiui, skirtingai turėtų elgtis virtualieji bozonai ir virtualieji fermionai. Panašu, kad šiuo metu aiškiai dominuoja stūmos jėgą sukurianti vakuuminė materija, visiškai nustelbusi traukos jėgą sukuriančią vakuuminę materiją. Tačiau toks jų tarpusavio santykis galbūt ilgainiui įvairiai keičiasi. Gal ateityje ims stipriau reikštis traukos jėgą sukuriantys fizikinio vakuumo komponentai?



9.2 pav. *Medžiagos tankio $\Omega_{m0} = \Omega_{v0} + \Omega_{bar0}$ ir stūmos jėgą sukeliančio fizikinio vakuumo materijos tankio Ω_Λ nustatymas panaudojant trijų rūšių nepriklausomų stebėjimų rezultatus. Užtamsintose juostose – stebėjimų teikiamos galimos Ω_{m0} ir Ω_Λ vertės. Juosta Nr. 1 parodo įvairiais stebėjimų ir teorinių samprotavimų metodais įvertintas galimas Ω_{m0} verčių ribas, juosta Nr. 2 – Ia tipo tolimų supernovų stebėjimų galimus rezultatus, juosta Nr. 3 – reliktinių fotonų fliuktuacijų stebėjimo duomenų aiškinimo Mūsų Visatos geometrijos euklidiškumu ($\Omega = \Omega_{m0} + \Omega_\Lambda \approx 1$) rezultatus (žr.* 9.9.6 *skirsnelį). Visų trijų juostų susikirtimo sritis parodo galimas Ω_{m0} ir Ω_Λ verčių ribas*

Nagrinėjant virtualiųjų dalelių fizikos reiškinius, gali kilti klausimas, kodėl stūmos jėgą sukuriančios vakuuminės energijos šiandieninis masės tankis toks mažas. Panašu, kad $\Omega_\Lambda \approx 0{,}66$ arba $\rho_\Lambda \approx 0{,}66 \cdot 10^{-26}$ kg·m^{-3}. Tuo tarpu galima galvoti, kad jis turėtų būti kur kas didesnis. Juk virtualiųjų dalelių turėtų nuolat atsirasti ir vėl tučtuojau išnykti nepaprastai daug ir pačių įvairiausių, tarp jų ir labai didelių energijų. Stūmos jėga tarytum turėtų būti tokia didžiulė, kad ne tik galaktikas išsklaidytų, bet ir žvaigždes ar net atomus sudraskytų. Tad kodėl šito nėra? Vadinasi, teorinė fizika dar daug ko nežino. Labai didelė pažanga intensyviai tobulinant stebėjimų galimybes ir kuriant visatų kilmės ir raidos teorinius modelius leidžia tikėtis, kad po keliolikos metų Mūsų Visatos istoriją, jos kilmę, praeitį ir ateitį pažinsime daug patikimiau ir išsamiau negu dabar.

O kol kas ši prieš keletą metų iš stebėjimų aptikta stūmos jėgą sukurianti vakuuminė materija tebėra paslaptinga. Dėl jos paslaptingumo ir kartu

svarbumo, fundamentalumo kai kurie autoriai net pradėjo ją pusiau juokais vadinti ***kvintesencija*** (lot. *quinta essentia* – penktoji esmė). (Juk Antikos filosofai įsivaizdavo, kad Visata sudaryta iš keturių elementų, arba esmių: žemės, vandens, oro ir ugnies. O penktoji, nežinoma esmė esanti pati svarbiausia. Nuo jos priklauso Visatos santvarka, jos stabilumas.) Šiuo pavadinimu norima pabrėžti, kad aptiktoji stūmos jėga, matyt, nėra konstanta, analogiška A. Einšteino įvestai kosmologinei konstantai Λ (žr. **9.2**, **9.3.3**, **9.7.1**, **9.7.2**, **9.7.3** skirsnelius). Ji galbūt ilgainiui gali keistis, pavyzdžiui, dar labiau sumažėti ar net pasikeisti į traukos jėgą.

Kai kurie autoriai kvintesencijos vardą anksčiau jau buvo beduodą nematomajai medžiagai. Aptikus dar paslaptingesnę materiją, šiuo vardu bandoma vadinti ją.

Ši hipotetinė stūmos jėgą sukurianti materija dažnai dar vadinama ***tamsiąja materija*** (angl. *dark matter*). Šiuo pavadinimu kaip tiktai ir norima pabrėžti, kad mes dar per mažai šią materiją pažįstame, kad čia galbūt yra ir fizikams dar visiškai nežinomų materijos egzistavimo formų.

9.3.5. Mūsų Visatos ateitis

Jei tikrai Mūsų Visata plėsis amžinai, tai ilgainiui ji tarytum išnyks – visiškai išsisklaidys. Maždaug per 10^{14} metų net pačių mažiausių masių žvaigždės, dargi ir vėliausiai gimusios, susidariusios iš pačių paskutiniųjų tarpžvaigždinės medžiagos likučių, virs juodosiomis nykštukėmis. Vietoj šviečiančių žvaigždžių liks tik juodosios bedugnės, ataušusios bei nurimusios neutroninės žvaigždės ir juodosios nykštukės. Per 10^{17} metų dėl atsitiktinių žvaigždžių suartėjimų visos planetos atitrūks nuo savo žvaigždžių. Per 10^{18} metų suirs visos galaktikos. Žvaigždėms atsitiktinai suartėjus, vienos jų įgauna hiperbolinius greičius ir ištrūksta į tarpgalaktinę erdvę, o kitos perdaug priartėja prie galaktikų centruose esančių didžiulės masės juodųjų bedugnių ir į jas įkrinta arba yra jų sudraskomos.

Tačiau pats didžiausias suirimas laukia dar ypač tolimoje ateityje. Juk manoma, kad ir protonai nėra absoliučiai stabilūs. Didžiojo sąveikų susivienijimo teorija (dar žr. **9.7.2** ir **9.7.3** skirsnelius) teigia, kad universaliosios sąveikos nešėjai – supersunkūs X ir Y bozonai gali kvarkus paversti leptonais ar antikvarkais. Jei protono viduje atsirastų tam tikros reikiamos rūšies X bozonas, tai jis, pavyzdžiui, galėtų vieną ten esantį u kvarką paversti pozitronu, o kitą – antikvarku $\bar{d}$. Šis antikvarkas tuojau sudarytų trumpalaikę sistemą su šiame (dabar jau buvusiame) protone dar likusiu d kvarku. O šitokia sistema – tai ne kas kita, kaip π^0 mezonas, kuris per $0{,}8 \cdot 10^{-16}$ s pavirsta dviem gama fotonais. Taigi šiuo atveju protonas suskiltų į pozitroną ir du gama fotonus.

Tiesa, galime ramintis, kad realūs X bei Y bozonai egzistavo tik besiformuojančios Mūsų Visatos pirmosios sekundės pradžioje. Dabar gali atsirasti tik virtualūs X ir Y bozonai, išsilaikantys vos 10^{-38} s ir per tą laiką nubėgantys tik $3 \cdot 10^{-30}$ m. Vadinasi, protonas suskils tik tuomet, kai jo abu u kvarkai atsitiktinai suartės iki 10^{-30} m ir tuo metu nuo vieno prie kito prabėgs ten atsiradęs X bozonas. O tokio įvykio tikimybė yra nepaprastai maža. Vis dėlto ši tikimybė didesnė už nulį. Tai reiškia, kad protonai, nors ir itin lėtai, tačiau nenumaldomai nyksta. Virtuališkai atsiradę universaliosios sąveikos nešėjai gali suskaldyti ir branduoliuose esančius neutronus. Teorija numato bent kelis nukleonų skilimo variantus, kurių rezultatai vienodai liūdni. Būtent protonai ir neutronai nesulaikomai virsta gama fotonais ir lengvosiomis dalelėmis – pozitronais bei neutrinais su antineutrinais. Žinoma, šis baisus procesas nepaprastai lėtas. Mes jo negalime praktiškai pajusti. Ir specialūs eksperimentai jo dar neaptiko. Paskutinieji nukleonai Mūsų Visatoje išnyks daugiau nei po 10^{32} metų.

Žvaigždžių ir planetų viduje vietoj suskilusių protonų atsiradę pozitronai tuojau pat anihiliuoja su artimiausiais elektronais. Taigi Mūsų Visatoje nepaliaujamai mažėja ne tik nukleonų, bet ir elektronų skaičius. Galiausiai išliks tik dalis tų elektronų, kurie dabar yra tarpžvaigždinėje ir tarpgalaktinėje medžiagoje. Tačiau jie bus daugelį parsekų nutolę vienas nuo kito ir nuo tokių pat negausių pavienių pozitronų – tarpžvaigždinių ir tarpgalaktinių protonų palikuonių dalies.

Pagaliau po 10^{100} metų nebeliks ir juodųjų bedugnių. Jos palaipsniui „išgaruos“ – išsisklaidys į fotonus ir leptonus, kurie juodųjų bedugnių masės ir energijos sąskaita retkarčiais gimsta jų artimoje aplinkoje. Tiesa, kol kas juodųjų bedugnių masė dar nemažėja, o didėja – į jas krinta ne tik medžiaga, bet ir fotonai, tarp jų ir reliktiniai fotonai (žr. **9.9** poskyrį). Tačiau po 10^{30}–10^{44} metų, kai reliktinių fotonų temperatūra dėl plėtimosi sumažės iki 10^{-9}–10^{-16} K, nusilpusių ir praretėjusių fotonų įkritimas nebekompensuos juodųjų bedugnių masės mažėjimo dėl jų lėto garavimo.

O gal mūsų dabartinis suvokimas apie būsimąjį amžinąjį Mūsų Visatos plėtimąsi nėra teisingas, gal Mūsų Visata kada nors vis dėlto liausis plėstis ir pradės trauktis? Kokios sąlygos tai turėtų lemti?

Paprasčiausiu atveju taip būtų, jei paaiškėtų, kad tikrovėje $\Omega > 1$ ir $\Omega_\Lambda = 0$ (tai iliustruoja **9.3** pav. 1-ji kreivė.). Tuomet galiotų (**9.6**) sąryšis, kuris turėtų šį pavidalą: $E_g + E_k < 0$. Šiuo atveju vis lėtėjantis Mūsų Visatos plėtimasis ilgainiui liautųsi, nes baigtųsi plėtimosi kinetinės energijos atsargos. Gravitacijos jėgos veikiama Mūsų Visata pradėtų trauktis – iš pradžių nepaprastai lėtai, o paskui vis greičiau ir greičiau. Elektromagnetinių bangų visumos temperatūra pradėtų iš lėto didėti, raudonasis poslinkis pasikeistų mėlynuoju. Per labai ilgą traukimosi laiką Mūsų Visatoje pasidarytų labai karšta ir ankšta, labai išaugtų Visatos tankis. Dar negalima pasakyti, kokia turėtų būti

Mūsų Visata paskutinėse jos susitraukimo akimirkose ir kuo tas susitraukimas turėtų baigtis.

Jei plėtimasis pasikeistų į traukimąsi dar nespėjus „išgaruoti“ juodosioms bedugnėms, į jas kristų vis daugiau ir daugiau fotonų bei medžiagos. O didėjančių masių juodosios bedugnės, susidurdamos imtų susilieti tarpusavyje. Galiausiai jose, matyt, atsidurtų visa Mūsų Visatos materija, o jos visos susilietų į vieną.

O kas būtų dar vėliau, fizikai kol kas dar nežino, nes nesupranta, kas dedasi juodosios bedugnės viduje. Kalbama apie singuliarumo būvį. Tačiau niekas nesuvokia, ką tai reiškia. Galbūt susitraukusios iki singuliarinio taško visatos vėl ima plėstis. Gal tai kartojasi ir kartojasi. Pagal vienas hipotezes šitokia osciliacija galėtų tęstis be galo. Kitos hipotezės teigia, jog amžinos osciliacijos negali būti – prieštarauja tas faktas, kad Mūsų Visatos entropija nėra be galo didelė. Juk entropija turi augti ir visatai plečiantis, ir jai traukiantis. Manoma, kad ji neturėtų sumažėti ir pasiekus singuliarinį tašką. Vadinasi, kartojantis be galo daug osciliacijos ciklų, entropija turėtų išaugti iki begalybės.

Jei Mūsų Visatos plėtimasis pasikeistų į traukimąsi juodosioms bedugnėms jau „išgaravus“, tai traukimosi etapo pabaiga galbūt būtų panaši į plėtimosi etapo pradžią. Dėl labai išaugusios temperatūros dauguma fotonų vėl taptų kietaisiais gama fotonais, o jų energijos sąskaita gimtų daugybė visokių dalelių, tarp jų ir protonų su neutronais. Labai greitai nukleonams ir kitiems hadronams pasidarytų per ankšta, jie vėl virstų ištisine kvarkų jūra. Vėl susivienytų silpnoji ir elektromagnetinė sąveikos. Greitai prie jų prisijungtų ir stiprioji sąveika, o dar po akimirkos – gal ir gravitacinė sąveika. O čia pat ir paslaptingoji singuliarumo būsena.

O gal šios nesuprantamos ir, matyt, nerealios singuliarumo būsenos galima išvengti laikantis hipotezės, kad susitraukimo etapą visata užbaigia jos materijai pereinant į fizikinio vakuumo formą. O iš fizikinio vakuumo gal vėl susidaro nauja visata ar visatos, tik visiškai kitokios negu ankstyvesnė. Gal tai kartojasi be galo.

9.4. MŪSŲ VISATOS GEOMETRIJA

Bendroji reliatyvumo teorija teigia, kad Mūsų Visatos geometriją nulemia (**9.10**) santykis: $\Omega = \rho_\Sigma/\rho_{kr}$.

Jei $\Omega = 1$, Mūsų Visatos kreivumo spindulys $R = \infty$, tinka Euklido geometrija. Taigi šiuo atveju mes gyvename plokščioje trimatėje begalinėje erdvėje. Vyrauja nuomonė, kad taip tikrovėje ir yra (žr. (**9.18**)–(**9.20**). Du trečdalius visos materijos tikriausiai sudaro fizikinio vakuumo materija (žr. (**9.20**). Ji duoda teigiamą indėlį į tankį, lemdama, kad būtų $\Omega = 1$ ir galiotų Euklido geometrija. Jei ši vakuuminė materija, kaip ir medžiaga, sukurtų vien tik

traukos jėgą, Mūsų Visata plėstųsi paraboliškai, taigi amžinai, tačiau visą laiką lėtėdama. Manoma, kad vakuuminės materijos indėlis į gravitaciją yra prieštaringas. (9.14) ir (9.16) sąryšiai rodo, kad ši materija vienu metu sukuria ir traukos jėgą, ir tris kartus stipresnę stūmos jėgą. Jų sumos rezultatas – stūmos jėga, kuri šiuo metu jau nugali medžiagos bei fotonų sukurtą traukos jėgą ir verčia Mūsų Visatą plėstis greitėjančiai.

Jei būtų $\Omega > 1$, tokios visatos erdvė, kaip teigia bendroji reliatyvumo teorija, būtų teigiamo kreivio ir uždara, baigtinio tūrio, nors niekur neturėtų jokių ribų. Tokiai visatai tinka ne Euklido, o Rymano geometrija. Jei tokia visata būtų homogeniška ir izotopiška, būtų galima apskaičiuoti jos ***kreivumo spindulį***:

$$R = \frac{c}{H}\sqrt{\frac{1}{\Omega - 1}}. \qquad (9.21)$$

Atskirose visatos vietose erdvės kreivis gali daug nukrypti nuo vidutinio kreivio. Taip galėtų būti dėl labai nevienodo medžiagos pasiskirstymo imant galaktikų superspiečių arba mažesnio masto nuotolius.

Taigi jei būtų $\Omega > 1$, tai Mūsų Visatos trimatė erdvė būtų ne plokščia, kaip mums atrodo kasdieniniame gyvenime, o sferinė. Jos tūris būtų baigtinis ir proporcingas kreivumo spindulio kubui:

$$V = 2\pi^2 R^3. \qquad (9.22)$$

Euklido geometrija, tinkančia plokščiai erdvei, apytiksliai būtų galima naudotis tik tiriant artimesnes galaktikas.

Jei trimatėje sferinėje erdvėje aplink bet kurį jos tašką brėšime vis didesnio spindulio sferas, tai šių sferų plotai, taip pat jų didžiųjų apskritimų ilgiai iš pradžių irgi bus vis didesni, kol pasieks maksimumą. O brėžiant dar didesnio spindulio sferas, apgaubiančias dar didesnius tūrius, jų plotai ir didžiųjų apskritimų ilgiai ims mažėti ir artės prie nulio. To neįmanoma parodyti brėžinyje ar trimačiame modelyje (kurio erdvė, aišku, yra plokščia). Tačiau tai įrodo Rymano geometrija.

Mūsų vaizduotei gali padėti analogija su plokščioje trimatėje erdvėje esančio rutulio paviršiumi. Geometrija jo paviršiuje skiriasi nuo Euklido geometrijos. Bet kurį rutulio paviršiaus tašką pavadinkime ašigaliu ir išbrėžkime atitinkamą koordinačių tinklą. Pavyzdžiui, geografinių platumų ir ilgumų tinklą ant Žemės gaublio. Toldami nuo šiaurės ašigalio, iš pradžių užtinkame vis ilgesnes lygiagretes. Ilgiausia iš jų yra pats Žemės gaublio pusiaujas. O keliaudami dar toliau į pietus, randame jau vėl trumpėjančias lygiagretes.

Įsivaizduokime ant šio mūsų aptariamojo gaublio gyvenančius kažkokius plokščius vabalus, kurių erdvė yra dvimatė. Trečiojo erdvės matavimo visiškai nėra. Tačiau ši jų dvimatė erdvė ne plokščia, o sferinė. Mūsų požiūriu – tai rutulio paviršius plokščioje trimatėje erdvėje. Rutulio paviršiuje trumpiausia linija (vadinamoji geodezinė linija) yra rutulį apjuosiančio didžiojo apskritimo lankas. Keliaudamas išilgai didžiojo apskritimo, plokščiasis vabalas gali

apkeliauti aplink visą rutulį ir, niekur neradęs jokios ribos, vėl sugrįžti į savo pirmykštę vietą, tik jau iš priešingos pusės. O jam atrodys, kad keliavo tiesia linija. Plokščiųjų vabalų mokslininkai gali apskaičiuoti rutulio spindulį R ir rutulio paviršiaus plotą $4\pi R^2$.

Panašiai ir trimatėje sferinėje erdvėje geodezinės linijos, kurias mes įsivaizduojame esant tiesėmis ir išilgai kurių plinta šviesa, iš tikrųjų nėra tiesės, o milžiniški lankai. Jei Mūsų Visatos erdvė būtų sferinė ir stacionari (nei plėstųsi, nei trauktųsi), tai šviesos spindulys, paleistas tiesia linija mūsų *žiūrėjimo į priekį kryptimi, aplėktų visą uždarą Mūsų Visatą ir galiausiai bakstelėtų mums į pakaušį. Tik laukti tektų dešimtis ar šimtus milijardų metų, o gal ir kur kas ilgiau.*

Jei būtų $\boldsymbol{\Omega} < 1$, tokios visatos plėtimosi greitis būtų didesnis už parabolinį greitį, net jei ir neegzistuotų stūmos jėga. Šiuo atveju (**9.21**) sąryšis pateikia menamą R vertę. Tokios visatos trimatė erdvė yra neigiamo kreivio, hiperbolinė, taigi neuždara. Euklido geometrija pritaikoma tik apytiksliai ir neliečiant pačių tolimiausių galaktikų bei kvazarų. Trimatės hiperbolinės erdvės dvimatis atitikmuo yra begalinis hiperboloido paviršius trimatėje erdvėje. Tokiam paviršiui galioja Lobačevskio geometrija.

9.5. MŪSŲ VISATOS AMŽIUS

Laikantis hipotezės, kad Mūsų Visata pradėjo plėstis iš taško, galima bandyti apskaičiuoti, kiek laiko praėjo nuo plėtimosi pradžios iki mūsų dienų. Pats paprasčiausias, tačiau mažiausiai tikslus skaičiavimas būtų padarius prielaidą, kad Visata visą laiką plėtėsi pastoviu greičiu. Du Visatos objektai, pavyzdžiui, du galaktikų spiečiai per laiką t nutolo vienas nuo kito iki nuotolio r. Jei jie vienas nuo kito tolo pastoviu greičiu $v = r/t$, tai Hablo dėsnio (**8.17**) išraiška būtų ši: $r/t = Hr$. Iš čia Mūsų Visatos amžius

$$t = 1/H. \qquad (\mathbf{9.23})$$

Tai sudaro apie 14 milijardų metų, jei H vertę $H_0 = 70\ \mathrm{km\cdot s^{-1}\cdot Mpc^{-1}}$ imame iš (**8.18**).

Tačiau aišku, kad Mūsų Visatos plėtimosi greitis ilgainiui bėgant kito. Iki 1998 metų, kol nebuvo aptiktas plėtimosi greitėjimas, buvo galvojama, kad Mūsų Visata visą laiką (išskyrus trumpučiukę, bet nepaprastai reikšmingą infliacijos erą, buvusią kažkada Mūsų Visatos egzistavimo pradžioje) plėtėsi ir plečiasi lėtėdama. Vadinasi, kuo toliau į praeitį, tuo plėtimosi greitis didesnis. Tuo pačiu didesnė ir H vertė. Taigi Visatos amžius turėtų būti daug mažesnis negu 14 milijardų metų. Padarius prielaidą, kad Mūsų Visata, pasibaigus infliacijos erai, toliau visą laiką plėtėsi vien tik iš inercijos, nes nebeliko stūmos jėgą sukuriančios materijos, ir kad $\Omega = 1$, standartiniai teoriniai modeliai Visatos amžiui apskaičiuoti pateikia šią išraišką:

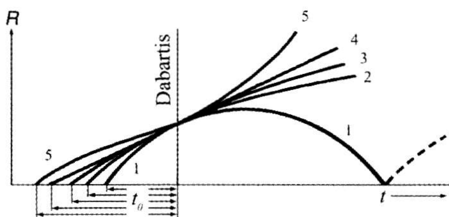
$$t_0 = \frac{2}{3H_0}. \quad (9.24)$$

Tai sudaro vos 9 ar 9,5 milijardų metų. O žvaigždžių evoliucijos modeliai seniausioms Mūsų Galaktikos žvaigždėms skiria ne mažiau kaip 11–16 milijardų metų. Iš kai kurių radioaktyviųjų izotopų kiekių santykių irgi apskaičiuojamas 10–16 milijardų metų amžius.

Taigi (**9.24**) išraiška siūlo aiškiai per mažą Mūsų Visatos amžių. O XX a. antrajame ir trečiajame ketvirčiuose šis prieštaravimas atrodė dar didesnis, (**9.24**) išraiška pateikdavo dar mažesnį Mūsų Visatos amžių, nes buvo pripažįstama didesnė Hablo konstantos H vertė. Todėl vis atsirasdavo teorinių modelių, kurie šį prieštaravimą bandė spręsti, pasinaudodami A. Einšteino kosmologinės konstantos Λ idėja, kitaip sakant, darydami prielaidą, kad bent tam tikrą laiką buvo $\Omega_\Lambda > 0$. Tai reiškia, kad tuo metu Mūsų Visatos plėtimosi pagreitį reguliavo ne tik gravitacijos, bet ir antigravitacijos jėga. Tokie modeliai nepripažįsta (**9.24**) išraiškos ir pateikia didesnį Mūsų Visatos amžių. Juk veikiant stūmos jėgai, Mūsų Visatos plėtimosi greitis, nusakomas Hablo konstantos H skaitmeninės vertės, turėjo mažėti ne taip sparčiai, kaip būtų mažėjęs be stūmos jėgos. Kai kurie šios rūšies modeliai net teigė, kad po kelių milijardų metų silpnėjanti traukos jėga pagaliau nusileido stūmos jėgai, dėl to Mūsų Visatos plėtimasis liovėsi lėtėjęs ir pradėjo greitėti. Remiantis šios rūšies modeliais (kuomet $\Omega_\Lambda > 0$), H skaitmeninė vertė praeities laikotarpiams apskaičiuojama mažesnė negu $\Omega_\Lambda = 0$ atveju. Tai ir pailgina apskaičiuotąjį Mūsų Visatos amžių, panaikina anksčiau minėtus prieštaravimus.

Matome, kad kai kurie kosmologijos specialistai, bandydami išspręsti Mūsų Visatos amžiaus problemą (kad apskaičiuotasis Visatos amžius nebūtų mažesnis už jos narių, pavyzdžiui, seniausiųjų žvaigždžių amžių), sėkmingai prognozavo stūmos jėgos buvimą dar gerokai iki 1998 m., kuomet šią jėgą pagaliau aptiko Ia tipo supernovų stebėbėtojai. Kaip jau kalbėjome, tą patį prognozavo ir kvantinės mechanikos specialistai, gvildenantys virtualiųjų dalelių fizikos klausimus.

Šiuolaikiniai modeliai kaip labiausiai tikėtiną Mūsų Visatos amžiaus vertę pateikia maždaug 14 milijardų metų.



9.3 pav. *Mūsų Visatos plėtimosi pobūdžio teoriniai variantai. 1.* $\Omega > 1, \Omega_\Lambda = 0$. *2.* $\Omega = 1, \Omega_\Lambda = 0$. *3.* $\Omega < 1, \Omega_\Lambda = 0$. *4. Visata plečiasi pastoviu greičiu (ji turėtų būti tuščia). 5.* $\Omega_\Lambda > 2\Omega_m$. *R – Mūsų Visatos spindulys arba mastelio faktorius, tai yra nuotolis tarp dviejų taškų, Visatai plečiantis tolstančių vienas nuo kito. t – laikas.* t_0 *– dabartinis Mūsų Visatos amžius. Matome, kad* $\Omega_\Lambda > 0$ *atveju dabartinė Hablo konstantos vertė* H_0 *pateikia didesnį dabartinį Mūsų Visatos amžių negu* $\Omega_\Lambda = 0$ *atvejais*

9.6. DIDŽIOJO SPROGIMO HIPOTEZĖS PROBLEMOS

9.6.1. Singuliarumo problema

Apie šią problemą jau kalbėjome 9.2 poskyryje. Ankstesnių laikų standartiniai kosmologiniai modeliai teigdavo, kad Visatos evoliucija prasidėjo Didžiuoju Sprogimu iš singuliarinio taško, o Visatos masės tankis tuo metu buvo begalinis. Tačiau begalinio tankio negali būti.

9.6.2. Sprogimo problema

Kyla klausimas, iš kur atsirado milžiniška stūmos jėga, sukėlusi neįsivaizduojamos galios sprogimą. Ir apskritai plėtimosi iš singuliarinio taško neturėtų būti. Juk tai primena juodosios bedugnės būseną. Sprogimo būta nepaprastai simetriško. Jei į kurią nors pusę Visata būtų plėtusis bent trupučiuką greičiau, dabar šį faktą aiškiai rodytų reliktinių fotonų (žr. 9.9 poskyrį) ir galaktikų pasiskirstymo asimetrija. Antra vertus, jau pačioje sprogimo pradžioje turėjo būti visiškai mažytės, tačiau tam tikro griežtai nustatyto didumo materijos tankio fliuktuacijos. Jos vėliau, jau po kosmologinio debesies rekombinacijos (žr. 9.9.4 ir 9.9.6 skirsnelius), labai išaugo, ir dėl to atsirado galaktikos bei jų sistemos.

Taigi Didysis Sprogimas iš singuliarinio taško turėjo būti kažkoks labai specifinis, nepaaiškinamas fizikos mokslo ir tenkinantis specialius reikalavimus. Dar vienas tokių reikalavimų – tam tikras labai griežtai nustatytas sprogimo stiprumas. Apie tai kitame skirsnelyje.

9.6.3. Sprogimo jėgos tikslumo, arba kritinio tankio, problema

Mūsų Visatoje realusis masės tankis ρ_Σ arba prilygsta kritiniam tankiui ρ_{kr} ($\Omega = \rho_\Sigma/\rho_{kr} = 1$), arba nelabai daug nuo jo tesiskiria, ir dėl to Visatos trimatė erdvė yra plokščia arba beveik plokščia, jos geometrija euklidinė arba beveik euklidinė. Kodėl taip yra? Juk Ω nukrypimas nuo vieneto, laikui bėgant, didėja. Pavyzdžiui, kai Visatos amžius tebuvo vos 10^{-32} s, šis nukrypimas turėjo būti net 10^{50} kartų mažesnis už dabartinį. Vadinasi, sprogimo stiprumas turėjo būti kaip tiktai toks, kad Visata imtų plėstis greičiu, kuris nepaprastu tikslumu atitiko parabolinį greitį. Tradiciniai kosmologiniai modeliai negalėjo paaiškinti, koks principas tai lemia.

9.6.4. Horizonto problema

Kosmologinis horizontas – tai riba, iš kurios laiko momentu t stebėtoją pasiekia šviesos greičiu c sklindantis signalas, pradėjęs savo kelionę Visatos egzistavimo pradžioje. Tagi horizonto nuotolis $r = ct$ visą laiką šviesos greičiu didėja. Dabartiniu momentu $r_0 = ct_0$. Jei dabartinis Mūsų Visatos amžius $t_0 = 14$ milijardų metų, tai $r_0 = 14 \cdot 10^9$ šm (angl. *ly*) = $1{,}3 \cdot 10^{26}$ metrų.

Gauti žinių arba kokį nors poveikį iš objektų, esančių už horizonto, iš principo neįmanoma. Ir ne vien dėl to, kad nespėja atlėkti šviesos greičiu plintantis signalas. Antroji priežastis – be galo išaugęs raudonojo poslinkio rodiklis z (žr. (**8.14**). Iš sričių, esančių nelabai toli nuo horizonto, mus pasiekia daug kartų pailgėjusios elektromagnetinės bangos. Visata plečiasi kaip tiktai tokiu greičiu, kad iš paties horizonto atlekiančių elektromagnetinių bangų pailgėjimo matas turėtų būti $z + 1 = \infty$.

Toks sferos pavidalo horizontas gaubia bet kurį Mūsų Visatos tašką. Kitaip sakant, bet kuris Visatos taškas turi savo horizontą. Jei kuris nors Visatos objektas yra mūsų horizonte, tai mes esame jo horizonte. Už mūsų horizonto esantiems objektams mes nematomi, nes esame už jų horizontų. Objektai, kuriuos skiria horizontas, negali vienas kito nei matyti, nei gauti kokią nors kitokią informaciją vienas apie kitą, nei kaip nors paveikti vienas kitą. Tarytum jie vienas kitam neegzistuotų.

Mes galime matyti daugybę tokių sričių, kurios yra viena kitai už jų horizontų, tačiau šiapus mūsų horizonto. Tik reikia, kad jos būtų pakankamai toli nuo mūsų ir kad kryptis į jas skirtų pakankamai didelis kampas. Pavyzdžiui, priešingose dangaus pusėse matomos galaktikos yra horizonto perskirtos, jei tik jų raudonųjų poslinkių rodikliai mūsų atžvilgiu $z > 1$. O labai tolimoje praeityje tokių horizontu perskirtų sričių dabartiniu metu mūsų žvilgsniui prieinamame tūryje buvo nepaprastai daug. Kuo senesnė praeitis, tuo jų gausiau. Juk šviesa plinta pastoviu greičiu, o Visatos plėtimasis pirmuosius 6–9 milijardus metų vis lėtėjo. Iki 1998 m. buvo manoma, kad ir dabar jis tebelėtėja.

Įsivaizduokime kuriame nors Visatos taške esantį stebėtoją. Jį iš visų pusių gaubia horizontas, visą laiką tolstantis šviesos greičiu. Laiko momentu t_1 horizonte yra kažkokie konkretūs objektai. Jie nuo stebėtojo tolsta irgi praktiškai šviesos greičiu. Tačiau tai trunka tik akimirką. Jei Visatos plėtimasis lėtėja, anksčiau horizonte buvę objektai vėlesniu laiko momentu t_2 tolsta jau mažesniu, nebe šviesos greičiu. Nuo šviesos greičiu tolstančio horizonto jie jau atsiliko ir atsidūrė šiapus horizonto. O horizontas jau prisivijo ir lenkia vėl kitus objektus, kurie dar vėlesniu laiko momentu t_3 irgi atsidurs šiapus horizonto.

Akivaizdu, kad labai tolimoje praeityje, kol Mūsų Visata plėtėsi lėtėdama, nepaliaujamai gausėjo šiapus horizonto atsidūrusių objektų, didėjo jų

bendra masė. Pavyzdžiui, elektromagnetinės ir silpnosios sąveikų išsiskyrimo metu, kai Mūsų Visatos amžius tesiekė 10^{-10} s, horizontas gaubė vos 3 cm spindulio rutulį. Tokiame tūryje tuomet tilpo tiek masės, kiek dabar visame Žemės rutulyje. Po 10^{-4} s, baigiantis hadronų erai (žr. **9.7.6** skirsnelį), horizontas jau buvo už 30 km. Tokio rutulio masė tuomet prilygo 2,5 Saulės masių. Per dešimtį sekundžių, kol truko leptonų era (žr. **9.7.7** skirsnelį), horizontas nutolo iki 3 milijonų km. Šitokio tūrio masė jau siekė 250 000 Saulės masių. Visatai sulaukus 300 000 metų, horizontas atsidūrė už 300 000 šm. Tokio spindulio rutulio masė tuomet net 10^5 kartų buvo didesnė nei dabartinė mūsų Galaktikos masė (į pastarąją įskaitant ir nematomosios medžiagos masę). Tiesa, šiuose pavyzdžiuose masė apskaičiuota neatsižvelgus į tai, kad arti horizonto esančioms sritims reikėtų priskirti didesnį, buvusį praeityje tankį. Taip pat neatsižvelgta į reliatyvumo teorijos efektus. Bet tai nekeičia pavyzdžių esmės: iš pradžių Visata buvo susiskaldžiusi į kolosalų skaičių visiškai viena nuo kitos izoliuotų mažyčių sričių, negalėjusių viena kitos kaip nors paveikti, net signalais nesuspėjusių apsikeisti. Ilgainiui buvusios izoliuotos sritys vis stambėjo – jungėsi tarpusavyje.

Ir štai paaiškėjo nuostabus, tiesiog nesuprantamas dalykas – visose viena nuo kitos izoliuotose srityse būta visiškai vienodos kosmologinės plazmos su vienoda temperatūra, tankiu ir chemine sudėtimi. Visur vienam nukleonui atiteko visiškai vienodas fotonų skaičius. Visur veikia vienodas Visatos plėtimosi dėsnis. Tiesa, būta visiškai nedidelių tankio fliuktuacijų, kurios vėliau, labai išaugusios, davė pradžią galaktikų ir jų sistemų atsiradimui. Tačiau ir fliuktuacijos visose izoliuotose Mūsų Visatos srityse buvo visiškai vienodos. Tai rodo skirtingomis kryptimis matomų galaktikų bei jų sistemų ir reliktinių fotonų stebėjimai.

Kokiu būdu izoliuotos, viena su kita nesusijusios sritys susiformavo visiškai vienodos? Peršasi mintis, kad Mūsų Visata kažkuriuo metu, galbūt pačioje savo raidos pradžioje, buvo vieninga, nebuvo suskaldyta horizonto. Tačiau kokiu būdu ji susiskaldė, atskiros jos sritys atsidūrė viena kitai toli už horizonto? *Taip galėjo atsitikti tiktai tam tikrą laiką plečiantis daug greičiau už šviesą!* Tai ir yra ***horizonto problema***, ***horizonto paradoksas***.

9.7. MŪSŲ VISATOS RAIDOS EROS

9.7.1 Kosmologiniai modeliai

Kosmologija yra mokslas apie visos Mūsų Visatos kaip vieningos sistemos fizikinę prigimtį, sandarą, kilmę ir evoliuciją. Bandymai sukurti Visatos sandaros ir raidos, kitaip sakant, ***kosmologinius modelius*** – tai pastangos sudaryti

ir išspręsti matematines lygtis, siejančias Visatos vidutinį tankį, temperatūrą, slėgį, erdvės savybes, jos kreivumo spindulį ir parodančias šių dydžių priklausomybę nuo laiko. Naudojama bendroji reliatyvumo teorija. Tačiau vėliau paaiškėjo, kad ir naudojantis Niutono mechanika, gaunama nemažai tų pačių išvadų.

Kosmologiniuose modeliuose paprastai kalbama apie Visatą, neišsiaiškinant, ką šis terminas reiškia. Iš tikrųjų jis dažniausiai reiškia vien tik Mūsų Visatą. Ankstyvesnieji kosmologiniai modeliai visiškai nenagrinėjo klausimo apie kitų visatų egzistavimo galimybę.

Šiuolaikinio lygio kosmologiniai modeliai, kaskart pritaikant naujausias matematikos ir fizikos žinias, pradėti kurti nuo 1917 m. Pradininkas – A. Einšteinas, tuo metu paskelbęs bendrąją reliatyvumo teoriją.

Pačiu paprasčiausiu pavidalu pagrindines kosmologinių modelių lygtis galima užrašyti šitaip:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + 2R\frac{d^2R}{dt^2} + \frac{8\pi Gp}{c^2}R^2 = -kc^2 + \Lambda R^2, \qquad (\mathbf{9.25a})$$

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \frac{8\pi G\rho}{3}R^2 = -kc^2 + \frac{1}{3}\Lambda R^2. \qquad (\mathbf{9.25b})$$

Šiose lygtyse ***R*** yra ***Visatos kreivumo spindulys***. Jei $\Omega = 1$, Visatos erdvė yra euklidinė, jos kreivumo spindulys lygus begalybei. Šiuo atveju (**9.25**) lygtyse R yra vadinamasis ***mastelio faktorius***, t. y. laiko funkcija, parodanti, kaip ilgainiui kinta nuotolis tarp bet kokių dviejų Visatos taškų. Nuo Ω vertės priklauso ir konstanta k. Jei $\Omega > 1$, tai $k > 0$, jei $\Omega = 1$, tai $k = 0$ ir jei $\Omega < 1$, tai $k < 0$. $\mathbf{\Lambda}$ yra Einšteino sugalvota vadinamoji ***kosmologinė konstanta***, atsižvelgianti į tai, kad be mums įprastos gravitacijos jėgos, Visatoje dar galėtų būti ir kitokių, papildomų stūmos ($\Lambda > 0$) arba traukos ($\Lambda < 0$) jėgų. Visi kiti simboliai (**9.25**) lygtyse yra standartiniai. Pavyzdžiui p – Visatos slėgis, ρ – jos vidutinis visų materijos formų bendras masės tankis, G – gravitacijos konstanta ir t. t. Vėlesniais laikais, ypač atradus reliktinius fotonus ir galutinai įsitikinus, kad praeityje Visata buvo karšta, prie (**9.25**) dar buvo pridurta ir Visatos temperatūros priklausomybės nuo laiko lygtis.

Bendruoju atveju (**9.25**) lygtys yra neišsprendžiamos. Todėl naudojamos kai kurios prielaidos, atliekamas skaitmeninis integravimas.

Pirmąjį savo lygčių sprendinį 1917 m. pateikė pats A. Einšteinas. Jis, prisilaikydamas tuo metu visuotinai įsigalėjusios nuomonės, kad Visata nei plečiasi, nei traukiasi, darė prielaidą, kad nežinomos prigimties stūmos jėga (specialiai parinkto didumo Λ narys) bet kuriame Visatos taške visiškai atsveria traukos jėgą, ir dėl to Visata lieka statiška.

1922 m. rusų fizikas Aleksandras Fridmanas (**9.25**) lygtis sprendė daug bendriau, keisdamas kosmologinės konstantos vertes, panaudodamas ir vertę

$\Lambda = 0$. Jis įrodė, kad Visata privalo arba plėstis arba trauktis. Po septynerių metų, A. Fridmanui jau mirus, Visatos plėtimąsi galutinai patvirtino stebėjimų duomenys (nustatytas Hablo dėsnis).

Įsivyravo nuomonė, kad Visata savo plėtimąsi pradėjo Didžiuoju Sprogimu iš singuliarinio taško, toliau plečiasi iš inercijos, plėtimosi greitį lėtina gravitacija, o jokių papildomų stūmos ar traukos jėgų nėra, vadinasi, $\Lambda = 0$. Liko neaišku, kokią pridera pasirinkti konstantos k vertę. Šitokio tipo modeliai dažnai vadinami ***Lemetro ir Fridmano modeliais***. Žinoma, sudarant ir tobulinant šiuos modelius, nemažai dirbo ir kiti mokslininkai.

Pažiūrėkime į keletą šių modelių sprendinių. Jie nėra visiškai griežti, o šiek tiek apytiksliai. Labiausiai trukdo spragos mūsų žiniose apie galimą įvairių elementariųjų dalelių buvimą ir jų kiekius ankstyvuosiuose Mūsų Visatos evoliucijos etapuose. Dauguma sąryšių apskaičiuoti euklidinei (plokščiai) Visatai (kai $k = 0$). Tačiau dažniausiai jie turėtų pakankamai teisingai atspindėti tikrovę ir tuo atveju, jei paaiškėtų, kad Mūsų Visata nėra euklidinė.

Pats bendriausias, tiesa, šiek tiek apytikslis modelių be Λ nario sprendinys yra šitoks:

$$R = \text{const}\cdot t^{a}; \qquad (\textbf{9.26})$$

čia R – mastelio faktorius, o jei $k \neq 0$, gali būti ir Visatos kreivumo spindulys, t – Visatos amžius (laikas, praėjęs nuo singuliarumo būsenos).

Jei Visata euklidinė ($k = 0$) ir joje viešpatauja didelis teigiamas slėgis ($p > 0$), tai

$$R = \text{const}\cdot t^{1/2} \qquad (\textbf{9.27})$$

ir plėtimosi greitis

$$v = \text{const}\cdot t^{-1/2}. \qquad (\textbf{9.28})$$

O jei $k = 0$ ir $p = 0$, tai

$$R = \text{const}\cdot t^{2/3}, \qquad (\textbf{9.29})$$

$$v = \text{const}\cdot t^{-1/3}. \qquad (\textbf{9.30})$$

Lemetro ir Fridmano modeliuose (kai $\Lambda = 0$) (**9.27**) ir (**9.28**) sąryšiai naudojami aprašant Visatos būklę tik per pirmuosius 200 000–400 000 metų. Per tą laiką Mūsų Visata atvėso iki 4000–3000 K, jos labai gausūs fotonai iš γ spindulių palaipsniui virto regimosios šviesos, o daugiausia infraraudonaisiais spinduliais, buvusi kosmologinė plazma rekombinavo ir tapo pailgėjusių bangų fotonams skaidriu neutralių vandenilio ir helio atomų debesiu, taigi fotonų visuma atsiskyrė nuo medžiagos. Dėl visų šių procesų visiškai sunyko ankščiau viešpatavęs didžiulis teigiamas Mūsų Visatos slėgis. Jis daugiau nebeprisidėjo prie gravitacinio lauko sukūrimo, tuo pačiu ir prie Visatos plėtimosi stabdymo. Mūsų Visatos plėtimasis ėmė lėtėti nebe taip sparčiai, mastelio faktorius R pasidarė jautresnis laiko tėkmei. Aprašant Visatos būklę vėlesniuose laikotarpiuose, jau reikia palaipsniui pereiti prie (**9.29**) ir (**9.30**) sąryšių.

Kol galiojo (**9.27**) ir (**9.28**) sąryšiai, Visatos temperatūra T (kelvinais) nuo laiko t (sekundėmis) apytiksliai priklausė šitaip:

$$T = b \cdot 10^{10} \cdot t^{-1/2}. \qquad (9.31)$$

Konstantos b vertė artima 1. Ji priklauso nuo to, kokių dar dalelių, be fotonų, yra Visatoje kartu su fotonais.

Įsigaliojus (**9.29**) ir (**9.30**) sąryšiams, nuo medžiagos atsiskyrusių reliktinių fotonų sistemos (žr. **9.9** poskyrį) temperatūros T_f žemėjimo greitis irgi pasidarė jautresnis laiko tėkmei, nes $T_f \sim (1/R)$. R išraišką paėmę iš (**9.29**), apytiksliai gauname:

$$T_f = 1{,}52 \cdot 10^{12} \cdot t^{-2/3}. \qquad (9.32)$$

Atrodytų, kad dar greičiau turėjo pradėti žemėti kosmologinio debesies vandenilio ir helio dujų mišinio temperatūra T_d. Juk izoliuotų idealiųjų dujų $T \sim R^{-2}$. Vadinasi,

$$T_d = \text{const} \cdot R^{-2} = \text{const} \cdot t^{-4/3}. \qquad (9.33)$$

Tačiau dėl rekombinacijos kosmologinio debesies dujos netapo absoliučiai skaidrios ir tuo pačiu visiškai izoliuotos nuo reliktinių fotonų. Labai maža dalis fotonų vis dėlto buvo absorbuojami, jų energija atitekdavo dujoms. Tiesa, dujos pačios spinduliavo prarasdamos šiek tiek savo šiluminės energijos. Tarp šių abiejų priešingų procesų vyravo pirmasis, nes reliktinių fotonų Mūsų Visatoje yra milijardą kartų daugiau negu nukleonų. Todėl T_d negalėjo ilgainiui pasidaryti daug žemesnė už T_f. Taigi (**9.33**) sąryšiui reikia pataisų, kurios padidintų dujų temperatūrą.

Tačiau (**9.33**) sąryšis net ir su pataisomis galiojo nelabai ilgai, nes, labai išryškėjus jau anksčiau buvusioms visiškai mažoms tankio fliuktuacijoms, vientisas kosmologinis debesis suskilo į atskirus fragmentus, kuriuose dėl sustiprėjusios gravitacijos plėtimosi greitis savųjų centrų atžvilgiu ėmė vis labiau atsilikti nuo bendro visos Mūsų Visatos plėtimosi lokalinio greičio. Galiausiai tokie fragmentai visai nustojo plėstis ir pradėjo trauktis. Dar vėliau juose prasidėjo žvaigždėdara ir žvaigždžių evoliucija. Taip dujose išsilaisvino labai daug gravitacinės ir branduolinės energijos, kurios didelė dalis virto šilumine energija. Dujų temperatūra įvairiuose objektuose pasidarė labai nevienoda, tačiau visur daug aukštesnė už reliktinių fotonų sistemos temperatūrą, kurios vertė dabar yra 2,728 K.

Visatos jausnystėje, kol galiojo (**9.27**), (**9.28**) ir (**9.31**) sąryšiai, nes slėgis $p > 0$, visų materijos formų bendras masės tankis

$$\rho = 5 \cdot 10^{8} \cdot t^{-2}\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}. \qquad (9.34)$$

Po kosmologinės plazmos rekombinacijos, kai pasidarė $p = 0$ ir įsigaliojo (**9.29**), (**9.30**), (**9.32**) ir (**9.33**) sąryšiai,

$$\rho = 8 \cdot 10^{8} \cdot t^{-2}\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}. \qquad (9.35)$$

Tačiau prisiminkime, kad Lemetro ir Fridmano modeliai paremti prielaida, jog Visatoje nėra neigiamo slėgio ir antigravitacinės jėgos ($\Lambda = 0$), jog Visata visą laiką plečiasi vien tik iš inercijos, o jos plėtimąsi visą laiką lėtina

gravitacijos jėga. Tačiau, kaip jau aprašyta **9.3** poskyryje, atsirado rimtų prieštaravimų šiai nuomonei. Naujausi Ia tipo supernovų stebėjimų duomenys (dėl kurių dar tebesiginčijama) tarytum teigia, kad Mūsų Visata plėtėsi lėtėdama tik pirmuosius 6–9 milijardus metų. O vėliau ėmė plėstis vis labiau greitėdama. Jei tai tiesa, Mūsų Visatoje egzistuoja ne tik gravitacijos, bet ir antigravitacijos jėgos, veikia neigiamas slėgis, $\Lambda > 0$. O tai reikštų, kad negalioja (**9.26**)–(**9.35**) sąryšiai.

Tačiau šiais klausimais dar tebevyksta didžiuliai ginčai. Dar vis pateikiamos abejonės dėl stūmos jėgą sukuriančios tamsiosios materijos egzistavimo dabartiniu laiku. O jeigu jos egzistavimas ir pripažįstamas, tai lieka neaiški šitokios materijos prigimtis, jos charakteristikų priklausomybė nuo laiko.

Taigi dar nėra naujų visuotinai pripažintų sprendimų, kurie patikslintų (**9.26**)–(**9.35**) sąryšių pateikiamus duomenis. Manoma, kad tą laikotarpį, kuomet Mūsų Visata plėtėsi lėtėdama (tuomet jos amžius buvo mažesnis nei 6–9 milijardai metų), vis dėlto neblogai, nors ir apytikriai atspindi (**9.26**)–(**9.35**) sąryšiai. O vėlesnį laikotarpį, kuomet galbūt pradėjo dominuoti stūmos jėga, (**9.26**)–(**9.35**) sąryšiai turėtų atspindėti daug blogiau. Tačiau padėtį šiek tiek gelbsti vėlesniu laikotarpiu labai sulėtėjęs Mūsų Visatos raidos tempas, daug lėtesnis Mūsų Visatos charakteristikų keitimasis laikui bėgant. Kol tebevyksta karšti ginčai dėl kvintesencijos prigimties ir charakteristikų ar net dėl jos pačios egzistavimo, apytikriam orientavimuisi naudosimės duomenimis, apskaičiuotais remiantis (**9.26**)–(**9.35**) sąryšiais. Tokių duomenų lentelė Nr. 24 įdėta šios knygos pabaigoje.

Analizuojant Lemetro ir Fridmano, taip pat ir kitų modelių duomenis, kaskart pasitelkiant vis naujesnes fizikos žinias, maždaug prieš 40 metų sukurtas ir nuolat tobulinamas Mūsų Visatos raidos scenarijus. Jame išskiriamos šios skirtingos eros (laiką t pradedant skaičiuoti nuo Didžiojo Sprogimo pradžios): nuo 10^{-10}s iki 10^{-7}s – **kvarkų** ir **gliuonų plazmos era**, nuo 10^{-7}s iki 10^{-4} s – **hadronų era**, nuo 10^{-4} s iki 10 s – **leptonų era**, nuo 10 s iki 8000 metų – **spindulių era** ir nuo 8000 metų iki dabarties – **medžiagos era**. Vėliau, naudojantis fizikos pažanga, imta skverbtis ir į dar ankstesnius laikus, dar arčiau Didžiojo Sprogimo. Buvo sumodeliuota elektrosilpnosios sąveikos era, užtrukusi nuo 10^{-34}s ar 10^{-32}s iki 10^{-10}s, sukurta didžiojo sąveikų susivienijimo teorija, daugelyje šaltinių žymima simboliu GUT (angl. *grand unifield theory*), imta kalbėti apie GUT epochą.

O prieš 20 metų paslapties skraistė pagaliau buvo bent šiek tiek kilstelėta ir nuo paties Didžiojo Sprogimo. Mat buvo sumodeliuota dar viena fantastiškai trumpučiukė era, kurios metu fizikinis vakuumas besiformuojančią Mūsų Visatą privertė plėstis didžiuliu ir vis didėjančiu teigiamu pagreičiu, taigi eksponentiškai greitėjant. Ši hipotetinė era buvo pavadinta ***infliacijos***, arba ***de Siterio*, *era***.

Tačiau ji dar tebekelia daug ginčų ir abejonių. Ypač nesutariama dėl šios

eros viešpatavimo laiko ir trukmės. Čia galima įžiūrėti dvi tendencijas. Vieni kosmologijos specialistai, vadinamosios chaotiškosios infliacijos hipotezės šalininkai, daro išvadą, kad infliacijos era – tai ir yra pati Mūsų Visatos egzistavimo pradžia, pats Didysis Sprogimas. O kiti kosmologai šią erą nukelia šiek tiek vėliau, jos nesutapatina su Didžiuoju Sprogimu. Pastaroji nuomonė remiasi labiau užbaigta teorine analize, todėl čia mes ją pateiksime kaip pagrindinę ir vadinsime tradicine. Tačiau lygiagrečiai paliesime ir chaotiškosios infliacijos hipotezę. Šios abi nuomonės pavaizduotos ir **9.4** pav.

9.7.2. Universaliosios sąveikos era

Ji dar vadinama **didžiojo sąveikų susivienijimo teorijos (GUT) epocha**. Galbūt tai pati pirmoji Mūsų Visatos istorijos era, užtrukusi vos 10^{-35}s. Jos pati pradžia, kol kūrėsi pirmieji laiko kvantai (maždaug nuo 0 iki 10^{-43}s), dažnai vadinama ***Planko epocha***.

Ankstesniųjų laikų samprotavimus trikdžiusią singuliarumo problemą (žr. **9.2** ir **9.6.1** skirsnelius) dabar bandoma išspręsti, pasinaudojant naujausiomis fizikos žiniomis apie fizikinį vakuumą, t. y. pasinaudojant tomis idėjomis, kuriomis remiasi ir infliacijos eros modeliai (žr. **9.7.3** skirsnelį).

Taigi dabar manoma, kad begalinio tankio materijos niekada nebuvo. Planko epochoje bendras visų materijos formų tankis, matyt, siekė Planko vertę, t. y. apie 10^{96} kg·m^{-3}. Pačioje pradžioje turėjo vyrauti vakuuminė materija, sukūrusi didžiulę stūmos jėgą ir tuo būdu sukėlusi Didįjį Sprogimą. Jo pradžioje erdvė ir laikas dar nebuvo išsiskyrę. Jų vietoje buvo tiesiog erdvėlaikis. Tačiau jis tučtuojau skaldėsi. Kūrėsi ir nepaprastai greitai plėtėsi erdvė. Normalėjo laiko tėkmė.

Labai greitai, baigiantis Planko epochai, didžioji vakuuminės materijos dalis virto medžiaginės ir laukų formos materija, sukurianti ne stūmos, o traukos jėgą. Begimstanti Mūsų Visata ėmė plėstis nebegreitėdama kaip Planko epochoje, o lėtėdama.

Kaip prisimename iš fizikos, fundamentaliosios elementariosios dalelės, iš kurių sudaryta visa mums žinoma dabartinė medžiaga, skirstomos į **kvarkus** ir **leptonus**. Ir vienų, ir kitų yra po šešias rūšis. Štai šešios leptonų rūšys: **elektronas**, sunkusis elektronas, arba **miuonas**, žymimas μ, supersunkusis elektronas, arba **tauonas**, žymimas τ, ir pagaliau šias tris elektronų atmainas atitinkantys trijų rūšių neutrinai, žymimi ν_e, ν_μ ir ν_τ. Yra ir atitinkamų dvylika rūšių antidalelių.

Dabartinėje epochoje pavienių kvarkų nebūna. Susijungę po tris arba po du jie sudaro vadinamuosius **hadronus**, kurie dar skirstomi į **barionus** (trijų kvarkų sistema) ir **mezonus** (kvarko ir antikvarko sistema). Savo ruožtu

barionai skirstomi į **nukleonus** (tai protonas su neutronu) ir **hiperonus**. Esant mums įprastoms sąlygoms, iš visų hadronų stabilus tėra vien tik protonas.

Yra minčių, kad kvarkai irgi nėra elementariosios dalelės. Jie esą sudaryti iš hipotetinių **preonų**. Tačiau dar nepateikta įtikinamų argumentų, patvirtinančių šias mintis.

Sąveiką tarp fundamentaliųjų elementariųjų dalelių dabar lemia specialios **jungiančiosios dalelės**, kitaip sakant, **dalelės nešėjos**, kuriomis fundamentaliosios dalelės apsikeičia. Kiekvienai sąveikos rūšiai tarnauja vis kitokios dalelės nešėjos. Būtent gravitaciją perneša **gravitonai**, elektromagnetinę sąveiką – **virtualieji fotonai**, silpnąją – W^+, W^- ir Z^0 **bozonai** ir stipriąją – **gliuonai**.

Universaliosios sąveikos eroje buvo visiškai kitaip. Manoma, kad pačioje šios eros, o kartu ir Mūsų Visatos istorijos pradžioje pradedančių iš fizikinio vakuumo ir iš gama fotonų gausiai atsirasti elementariųjų dalelių energija siekė Planko vertę, tai yra vidutiniškai 10^{28} eV kiekvienai dalelei. Tai atitiko 10^{32} K temperatūrą. Esant tokiai dalelių energijai, galiojo ***superdidysis sąveikų susivienijimas***, vietoje tik ką išvardytų keturių sąveikų veikė tik viena jungtinė ***superuniversalioji sąveika***.

Prasidėjus Didžiajam Sprogimui, tai yra begimstančiai Mūsų Visatai pradėjus staigiai plėstis, jos temperatūra tuojau pat krito žemiau 10^{32} K. Dėl to suiro superuniversalioji sąveika, nes nuo jos atsiskyrė gravitacinė sąveika, susikūrė jos nešėjai – ***gravitonai***. O elektromagnetinė, silpnoji ir stiprioji sąveikos liko susijungusios į vadinamąją ***universaliąją sąveiką***. Sakome, kad vietoje superdidžiojo sąveikų susivienijimo ėmė galioti ***didysis sąveikų susivienijimas***. Iš fizikinio vakuumo atsirado gausybė šios sąveikos nešėjų – ypatingos rūšies jungiančiųjų dalelių, pavadintų ***X*** ir ***Y bozonais***. Aišku, kad tiek pat atsirado ir jų antidalelių – $\bar{X}$ ir $\bar{Y}$ ***bozonų***. Jie skaldėsi į visų rūšių kvarkus ir leptonus bei jų antidaleles. Tiesa, kol veikė universalioji sąveika, esminio skirtumo tarp kvarkų ir leptonų nebuvo, nes X bei Y bozonai galėjo kvarkus paversti leptonais arba antikvarkais ir atvirkščiai.

Galbūt tuo metu ir vėliau, baigiantis infliacijos erai, o gal net ir baigiantis elektrosilpnosios sąveikos erai, gimė dar daug kitokių rūšių elementariųjų dalelių, tarp kurių galbūt būta ir fizikams dar visiškai nežinomų, taip pat tokių, kurių egzistavimo galimybę jau patvirtina kai kurios fizikinės teorijos, tačiau jų vis dar negalėjome aptikti eksperimentuojant, nes su kvarkais ir leptonais jos sąveikauja vien tik ar beveik vien tik gravitacijos būdu. Tokių hipotetinių dalelių pavyzdžiai gali būti supersimetrijos principo numatomi jungiančiuosius bozonus atitinkantys neutralieji fermionai, kartais vadinami **neutralinais (gravitinas, fotinas, gliuinas, zinas, neutralusis higsinas)**, galbūt **elektringieji vinai** bei **higsinai**, **veidrodinės dalelės**, **aksionas** ir kiti. Masyviausios iš jų, masyvesnės už nukleonus, vadinamos **WIMP'ais** (angl. W*eakly interacting massive*

particles – silpnai sąveikaujančios masyvios dalelės). Jų silpnus pėdsakus tikimasi aptikti nauju, tobulesniu požeminiu ksenoniniu detektoriumi Anglijoje.

Teoriniai modeliai teigia, kad veikiant universaliajai sąveikai kartu su elementariosiomis dalelėmis turėjo susidaryti ir savotiški materijos mini telkiniai, magnetinio krūvio nešėjai, kurie teturi tik vieną magnetinį polių. Jie pavadinti ***magnetiniais monopoliais.*** Jų masė 10^{-8} g arba energijos vienetais 10^{25} eV. Jie turi sudėtingą vidinę struktūrą. Jų skersmuo 10^{-17} m, tačiau didžioji masės dalis sutelkta vos 10^{-30} m skersmens branduolėlyje, kuriame veikia universalioji sąveika, ten gausu šios sąveikos nešėjų X ir Y bozonų. Bandymai magnetinius monopolius aptikti eksperimentiškai tebėra nesėkmingi. Todėl galvojama, kad jų formavimasis nutrūko baigiantis universaliosios sąveikos erai, o nepaprastai pagreitėjęs Mūsų Visatos plėtimasis infliacijos eroje suspėjo juos išnešioti taip toli vienas nuo kito, kad beveik nėra vilties juos aptikti. Nesėkmė bandant aptikti magnetinius monopolius yra vienas iš argumentų už infliacijos eros hipotezę.

Jau minėjome, kad universaliosios sąveikos eroje kūrėsi ir greitai plėtėsi erdvė. Atrodo, kad linkstama patikėti tokiais teoriniais modeliais, kurie rodo, jog Mūsų Visatos erdvė kūrėsi ne trijų matmenų arba dimensijų, kaip šiandien, o didesnio matmenų skaičiaus. Panašu, kad būta devynių ar dešimties matmenų erdvės. Kadangi universaliosios sąveikos eros pradžioje laikas buvo neatskiriamas nuo erdvės, tai tuometinio erdvėlaikio matmenų skaičius, matyt, buvo 10 ar 11.

O kokiu būdu dabar beliko tik trys erdvės matmenys? Pagal kai kuriuos teorinius modelius ir dabar Mūsų Visatos erdvė turi daugiau negu tris matmenis. Tačiau tik trys iš jų siekia didžiulius nuotolius. O likusieji matmenys tesiekia 10^{-25} m ar dar mažiau, gal vos 10^{-34} m. Kai kurie matmenys galėtų būti jau ir visiškai išnykę. Šitoks atskirų erdvės matmenų sumažėjimas arba ir visiškas išnykimas, galbūt susitraukimas, o gal neišsiplėtimas, atsilikimas nuo Visatos plėtimosi vadinamas ***kompaktifikacija***.

Taigi mūsų gerai pažįstamos trimatės erdvės kiekvienas tarytum taškas galbūt yra ne taškas, o mažytė, vos 10^{-34}–10^{-25} m skersmens kilpa, aptinkama tik suvokiant ketvirtąjį erdvės matmenį. O jei tebėra ir penktasis, o gal ir šeštasis ar daugiau kompaktifikuotų matmenų, tai kiekvienas mūsų trimatės erdvės taškas, ko gero, yra ne taškas, o mažytė labai sudėtingos topologijos figūra. Jei mūsų eksperimentuotojai sugebėtų stebėti šitokias mažybes, galbūt praktiškai aptiktų daugiau negu trijų matmenų erdvę. Tačiau tai, matyt, tolimos ateities uždavinys.

Pripažįstant daugiamatmeninę Mūsų Visatos erdvę, sėkmingai kuriama ir plėtojama vadinamoji **superstygų teorija**, kuri teigia, kad elementariosios dalelės – tai stygos 10 matmenų erdvėje. Jos gali būti laisvos arba suriestos į žiedelius. Jos nepaprastai įtemptos ir virpa skirtingais dažniais, nuo kurių priklauso energija. O skirtinga energija reiškia ir skirtingą elementariosios

dalelės masę. Šios ultramikroskopinės stygos, kurias mes suvokiame kaip elementariąsias daleles, paprastai vadinamos ***superstygomis*** norint pabrėžti. kad čia remiamasi supersimetrijos samprata. Tarp šitokių modelių pagrindinių kūrėjų reikėtų paminėti Maiklą Griną (*M. Green*, Anglija), Džoną Švarcą (*J. Schwarz*, JAV), Edvardą Vitiną (*E. Witten*, JAV).

Kuriant ne tik universaliosios sąveikos eros, bet ir šiek tiek vėlesnių Mūsų Visatos raidos erų teorinius modelius, paaiškėja, kad nepakanka esamų fizikinių teorijų, kaip antai kvantinės mechanikos, specialiosios ir bendrosios reliatyvumo teorijų, kvantinės lauko teorijos, nes esamos teorijos nepajėgia aprašyti visų materijos apraiškų, ypač esant kraštutinėms fizikinėms sąlygoms. pavyzdžiui, labai didelės energijos ir didžiulio tankio atveju. Reikia bendresnės, universalesnės ir tikslesnės teorijos, kuri dabar intensyviai kuriama. Tikintis sėkmės, ši būsimoji teorija jau iš anksto pradedama vadinti „M teorija“, turint galvoje epitetus „mistinė“ ar „magiškoji“, o gal „motininė“. Minėtoji superstygų teorija yra šios kuriamosios teorijos dalis.

Kuriant „M“ teoriją atsirado nemaža įvairių jos atskirų fragmentų modifikacijų, daugiausia paremtų minties apie galimą Mūsų Visatos erdvės daugiamatiškumą. Pavyzdžiui, amerikietis Paulius Stainhartas (*P. J. Steinhardt*) ir anglas Nilas Turokas (*N. A. Turok*) iškėlė hipotezę, kad Didysis Sprogimas – tai tiesiog dviejų visatų susidūrimas.

Įsivaizduokime dvimačius vabalus, kuriems nėra trečiojo matmens. Jie gyvena ant dvimatės membranos, kuri vibruoja trimatėje erdvėje. Virš šios membranos vibruoja kita dvimatė membrana. Jos abi tai atitolsta viena nuo kitos, tai vėl labai suartėja, o kai kada net trenkiasi viena į kitą. Dvimačiams vabalams tokia membrana – tai jų „visata“.

Analogiškos p matmenų „membranos“, esančios didesnio matmenų skaičiaus erdvėlaikyje, pavadintos ***p branomis*** (sutrumpinus žodį membrana). Pavyzdžiui, kai $p = 1$, yra 1 brana, arba styga, kai $p = 2$, yra 2 brana, arba paviršius (membrana) ir t. t. Viena tokia trimatė (o įskaitant ir laiką – keturmatė) brana, arba branos pasaulis – tai Mūsų Visata. O antroji brana – kažkokia kita visata, galbūt Mūsų Visatos veidrodinis atspindis. Ji gali būti ir visiškai arti Mūsų Visatos, tačiau nuo mūsiškės atskirta erdvėlaikio penktojo matmens tarpeliu, kurio dydis, matyt, kinta, o tas kitimas gali būti ir periodinis. Kai šis tarpelis sumažėja iki nulio, abi branos trenkiasi viena į kitą (panašiai. kaip trimatėje erdvėje trenkiasi viena į kitą dvi membranos, pavyzdžiui, dvi orkestro lėkštės). Paskutinis toks dviejų branų susidūrimas buvęs prieš 14 milijardų metų. Pasak šios hipotezės, tai ir buvęs Didysis Sprogimas.

Jei gravitacijos, o gal ir antigravitacijos jėgos gali bent iš dalies prasiskverbti pro penktojo matmens tarpelį ir patekti į kitą visatą, šių jėgų dydis gali neatitikti jas sukūrusios materijos kiekiui visatoje. Jei tai būtų tiesa, mūsų įsivaizdavimui apie stūmos jėgą sukuriančios materijos ir nematomosios medžiagos prigimtį ir kiekį reikėtų svarbių pataisų.

Šis P. Stainharto ir N. Turoko modelis yra toli gražu neužbaigtas, turi vidinių prieštaravimų, sulaukia daug kitų kosmologijos specialistų priekaištų. Čia mes jį paminėjome tik kaip pavyzdį, parodantį, kokių esama įvairių ir netikėtų bandymų aiškinti visatų kilmę ir raidą. O dabar grįžkime prie labiau „tradicinių" modelių ir toliau prabėgomis tęskime universaliosios sąveikos eros įvykių supaprastintą aprašymą.

Universaliosios sąveikos eros metu Mūsų Visatos plėtimąsi reguliavo ir stūmos, ir traukos jėgos. Stūmos jėga labai vyravo pačioje pradžioje, paties Didžiojo Sprogimo metu. Vėliau ėmė ryškiau ar blankiau vyrauti traukos jėga. Mūsų Visata ėmė plėstis beveik iš inercijos, lėtėdama. Pradėjo apytiksliai galioti (**9.27**), (**9.28**) ir (**9.31**) sąryšiai. Nusistovėjo šiluminė pusiausvyra. Didžiulės gama fotonų energijos sąskaita atsirasdavo daugybė įvairiausių elementariųjų dalelių ir jų antidalelių porų. Jos visos buvo dar be rimties masės. Dalelėms su rimties mase tuomet dar tebebuvo per ankšta. Kas kita su bemasėmis dalelėmis. Jų masę priklausomai nuo energijos nusakė Einšteino formulė $m = E/c^2$. Esant šiluminei pusiausvyrai, atstumai tarp tokių rimties masės neturinčių dalelių yra tos pačios eilės, kaip ir jų bangų ilgiai, formaliai apskaičiuojami remiantis temperatūros nusakoma dalelių energija: $\lambda = c/\nu = ch/E$. Vadinasi, universaliosios sąveikos eros pradžioje nuotoliai tarp dalelių buvo vos 10^{-35}–10^{-31} m eilės! Jie labai sparčiai didėjo, nes Visata ypač greitai, daug greičiau negu dabar plėtėsi. Dėl to žemėjo jos temperatūra. Visą laiką išliko šiluminė pusiausvyra.

Tik ką susikūrusios dalelės tuojau pat anihiliuodavo (susijungdavo ir žūdavo) su arčiausiai atsidūrusiomis savos rūšies antidalelėmis, o jų vietoje atsirasdavo nauji gama fotonai. Vienos rūšies dalelės taip pat virsdavo kitos rūšies dalelėmis (žinoma, ir antidalelės). Savo ruožtu daugybė pakankamos energijos fotonų vėl virsdavo visokiausių dalelių ir antidalelių poromis. Taigi dalelės vis atsinaujindavo, be paliovos keitė viena kitą.

Rimties masės iš pradžių neturėjo ir universaliosios sąveikos kvantai – X ir Y bozonai. Tačiau nuo kitų dalelių jie skyrėsi tuo, kad turėjo būti ne mažesnės kaip 10^{23} eV energijos. Vadinasi, X ir Y bozonų bei jų antidalelių poros gausiai atsirasti galėjo tik iki to laiko, kol temperatūra tebebuvo aukštesnė už 10^{27} K.

Kai Mūsų Visatos laikrodis rodė 10^{-35} s, temperatūra sumažėjo iki 10^{28}–10^{27} K, o nuotoliai tarp dalelių išaugo iki 10^{-31}–10^{-30} m. Tuomet Mūsų Visatoje įvyko labai svarbus fazinis virsmas. Būtent X ir Y bozonai, sąveikaudami su **fizikinio vakuumo** komponentu, vadinamaisiais **Higso** laukais, įgijo rimties masę. Ši masė prilygo daugumos tuometinių visokiausių dalelių masei, nusakomai Einšteino formulės. Energijos vienetais tai sudaro 10^{23} eV. Tuo būdu X ir Y bozonai įgijo tokią didelę rimties masę, kuri net 10^{14} ir daugiau kartų didesnė už protonų rimties masę. (Žinoma, tuo metu nei protonų, nei kokių nors kitokių hadronų dar negalėjo būti. Tebebuvo ištisinė didžiulėje ankštumoje besiblaškančių kvarkų, leptonų ir jų antidalelių mišinio jūra.)

Toliau žemėjant Mūsų Visatos temperatūrai, X ir Y bozonai dėl savo didžiulės rimties masės labai greitai tapo virtualiosiomis dalelėmis, dargi ypač trumpalaikėmis, per 10^{-38} s pereinančiomis į fizikinį vakuumą. Juk jie nepaliaujamai anihiliavo. O vėl nevirtuališkai jiems gausiai susidarinėti nebeužteko gama fotonų energijos. Todėl jų skaičius labai sparčiai nyko. Dėl to suiro didysis sąveikų susivienijimas, nuo universaliosios sąveikos atsiskyrė **stiprioji sąveika**, veikianti tarp kvarkų. Kvarkai nebegalėjo gausiai virsti leptonais, o leptonai – kvarkais. Taip baigėsi universaliosios sąveikos era.

9.7.3. Infliacijos, arba de Siterio, era

Vyrauja nuomonė, kad ši ypatinga era viešpatavo tarp 10^{-35} ir 10^{-32}s. Ją, matyt, išprovokavo fazinis virsmas medžiagoje, kai X, $\bar{X}$, Y, $\bar{Y}$ ir kai kurie kiti bozonai įgavo rimties masę, ir dėl to po jų anihiliacijos suiro universalioji sąveika. Tai pažeidė fizikinio vakuumo stabilumą. O fizikinis vakuumas anuomet tebebuvo nepaprastai didelio tankio, dar neišsieikvojęs. Jo tankis galėjo siekti 10^{79} kg·m^{-3}. Tokio didelio tankio fizikinis vakuumas, sutrikdžius jo stabilumą, privalo nebesulaikomai, beveik iki visiško išsieikvojimo virsti medžiaginės ir laukų formos materija, kurią eksponentiškai greitėjančiu būdu kolosaliai išplečiama erdvė paskleidžia į neįsivaizduojamas platybes.

Tokio eksponentiškai greitėjančio Visatos plėtimosi teoriniai pagrindai buvo padėti dar 1917 m. Būtent tais metais, vos pora mėnesių vėliau už Einšteiną, (**9.25**) lygtis išsprendė ir olandų astronomas Viljemas de Siteris (*W. de Sitter*). Jo sprendinys buvo visiškai kitoks. Mat jis padarė prielaidą, kad stūmos jėgą nusakantis Λ narys visiškai nustelbia traukos jėgą. Dėl to Visata turi greitėjančiu tempu plėstis, nes jos spindulys arba mastelio faktorius R, laikui t bėgant, didėja eksponentiškai:

$$R = a\mathrm{e}^{bt}. \qquad (\mathbf{9.36})$$

Čia a ir b yra konstantos.

Kartu išryškėja anuo metu paradoksaliai atrodžiusi situacija: tokia Visata privalo turėti neigiamą slėgį. Juk de Siterio sprendinio (**9.36**) atveju Visatos slėgis p_Λ ir energijos tankis $\varepsilon_\Lambda = \rho_\Lambda c^2$ turi būti lygūs savo absoliučiu didumu, tačiau priešingų ženklų. Tai pateikta (**9.16**) sąryšyje. Šito atrodytų paradokso galima išvengti tarus, kad Visatoje nėra nei medžiagos, nei fizikinių laukų. Tuomet

$$\varepsilon = p = 0. \qquad (\mathbf{9.37})$$

Tačiau Mūsų Visata nėra tuščia. Joje yra ir medžiaga, ir laukai. Todėl de Siterio sprendinys atrodė tik kaip tikrovės neatspindintis įmantrių matematinių pratybų rezultatas ir ilgam laikui buvo atidėtas į šalį.

Tačiau XX a. antrojoje pusėje fizikai vis plačiau prakalbo apie naują materijos egzistavimo formą – ***fizikinį vakuumą*** (žr. **9.3.3** ir **9.3.4** skirsnelius). Literatūroje atsirado samprotavimų, teigiančių, kad Mūsų Visatos ankstyvojoje jaunystėje, galbūt net jos egzistavimo pačioje pradžioje fizikinis vakuumas galėjo vaidinti lemiamą vaidmenį ir garantuoti de Siterio sprendinio (**9.36**) galiojimą – priversti Visatą plėstis eksponentiškai greitėjant.

1981 m. JAV fizikas Alanas Gatas (*A. H. Guth*) šias mintis sukonkretino ir detalizavo. Greitai į šį darbą įsitraukė ir kiti įvairių šalių kosmologijos specialistai, pavyzdžiui, Andrej Linde (Sovietų Sąjunga, vėliau JAV), P. Stainhartas, Andreasas Albrechtas (*A. Albrecht*), Robertas Kritendenas (*R. Crittenden*) (visi JAV) ir daugelis kitų. Atsirado nemaža daugiau ar mažiau tarpusavyje panašių hipotezių ir jas detalizuojančių skaičiavimų. Šios hipotezės teigia, kad Mūsų Visatos raidoje buvo dar viena ypatinga era, pavadinta ***infliacijos***, arba ***de Siterio, era*** (angl. *inflation* – pripūtimas, išsipūtimas, infliacija). Jos metu galiojo (**9.36**) sprendinys, jis turi šią konkrečią išraišką:

$$R = R_0 e^{\sqrt{\frac{8\pi G}{3}\cdot\rho_\Lambda}\cdot t}. \qquad (\mathbf{9.38})$$

Čia G yra gravitacinė konstanta, ρ_Λ – stūmos jėgą sukeliančio fizikinio vakuumo energijos tankis masės vienetais, t – nuo pūtimosi pradžios praėjęs laikas.

Infliacijos erą aprašantys modeliai daugelį faktų ir reiškinių pateikia dar gana skirtingai. Pavyzdžiui, dar ginčijamasi dėl Visatos pūtimosi pradžios laiko, priežasties ir mechanizmo, dėl fizikinio vakuumo materijos prigimties ir tankio bei jo priklausomybės nuo laiko, dėl fizikinių procesų infliacijos eros metu, dėl šios eros trukmės, jos pabaigos detalių ir t. t. Kai kurie kosmologijos specialistai šią iš esmės dar vis paslaptingą fizikinio vakuumo materiją, galbūt davusią pradžią daugybei visatų ir impulsus joms plėstis, pavadino ***infliantonu***.

Priimtiniausiais laikomi modeliai rodo, kad toks pūtimasis, kartu ir visa infliacijos era užtruko vos nuo 10^{-35} iki 10^{-32} sekundės. Nėra vieningos nuomonės, kaip per tą trumputį laiką keitėsi fizikinio vakuumo tankis. Yra minčių, kad pradžioje jis laikėsi praktiškai pastovus, vėliau ėmė šiek tiek mažėti, o eros pabaigoje staiga sumažėjo beveik iki nulio. Laikydami, kad vidutinis vakuumo tankis išsipūtimo metu buvo 10^{78} kg·m^{-3}, iš (**9.38**) gauname:

$$R = R_0 e^{7{,}5\cdot 10^{33{,}5}\cdot t} = R_0 e^{7{,}5\cdot 10^{33{,}5}\cdot 10^{-32}} \approx R_0 \cdot 10^{100}. \qquad (\mathbf{9.39a})$$

Matome, kad išsipūtimo pradžioje visiškai greta, vos už 10^{-35} m viena nuo kitos buvusios Mūsų Visatos sritys, išsipūtimui baigiantis atsidūrė už $10^{100}\cdot 10^{-35}$ m $\approx 10^{65}$ m. Tai net 10^{39} kartų toliau negu iki dabar stebimosios Mūsų Visatos dalies (Metagalaktikos) pakraščių, iki kurių yra tiktai maždaug 10^{10} šm = 10^{26} m. Vidutinis išsipūtimo greitis $v = 10^{100}/10^{-32}$ m/s $\approx 10^{130}$ m/s.

Gavome *greitį*, neįsivaizduojamai daug kartų *didesnį negu šviesos greitis*!

Tačiau nieko paradoksalaus čia nėra. Juk Visatos sąlygomis greičio sąvoka egzistuoja tik iki tokių nuotolių, kurių perskirtos materijos sritys viena nuo kitos tolsta greičiu, ne didesniu už šviesos greitį. O kai nuotoliai pasidaro didesni, greičio sąvoka nebeegzistuoja, nes iš principo nebegalima sudaryti net mintinio eksperimento greičiui išmatuoti. Infliacijos eroje greičio sąvoka egzistavo tik tarp visiškai artimų sričių, dar tik pradėjusių vos vos išsiskirti, kurių tarpusavio tolimo greitis dar nepasiekė šviesos greičio vertės.

Kai kurie kosmologijos specialistai teigia, kad tais atvejais, kuomet stūmos jėgą sukelia fizikinio vakuumo materija, atskirų visatos objektų tolimas vienas nuo kito greičiau už šviesą neprieštarauja specialiajai reliatyvumo teorijai todėl, kad čia, tarytum, nėra materialių objektų judėjimo erdvėje didesniu nei šviesos greičiu, čia taip greitai plečiasi erdvė.

Pasiekus fantastiškai didelį Mūsų Visatos plėtimosi greitį, joje anksčiau buvusi medžiaginės ir laukų formos materija tapo visiškai išsklaidyta, jos tankis sumažėjo beveik iki nulio. Nukrito ir temperatūra. Jei universaliosios sąveikos eroje buvo susidarę magnetiniai monopoliai ir WIMP'ai, jų praktiškai nebeliko – tapo nepaprasta retenybe, nes atsidūrė kolosaliuose nuotoliuose vienas nuo kito.

Tačiau milžiniško tankio fizikinis vakuumas, pažeidus jo stabilumą, privalo greitai iširti – didžioji vakuuminės materijos dalis turi virsti medžiaginės ir laukų formos materija.

Taip ir atsitiko praėjus maždaug 10^{-32} s. Dėl to išnyko buvusi milžiniška stūmos jėga, suteikusi gigantišką plėtimosi impulsą. Tai infliacijos eros pabaiga. Nuo to momento Mūsų Visata 6–9 milijardus metų plėtėsi galbūt beveik vien tik iš inercijos. Toks plėtimasis lėtėjo, jį stabdė gravitacijos jėga. Plėtimosi pobūdį vėl ėmė nusakyti ne de Siterio, bet Lemetro ir Fridmano modeliai, kurių bendras sprendinys yra (**9.26**). Gravitacijos jėgą teikia medžiagos ir fizikinių laukų formos materija, atsiradusi infliacijos eroje, ypač jos pabaigoje, vietoje fizikinio vakuumo formos materijos.

Medžiagos ir laukų formos materijos atsirado neįsivaizduojamai daug. Nežiūrint neapsakomo išsipūtimo, Mūsų Visata vėl pasidarė didžiuliu tankiu pripildyta naujai atsiradusių elementariųjų dalelių su savo antidalelėmis ir gama fotonų. Medžiagos ir laukų formos materijos masės tankis pasiekė 10^{72} $kg \cdot m^{-3}$, temperatūra – 10^{26} K.

Vaizduotė neaprėpia ir Visatos plėtimosi kinetinės energijos didumo. Juk pradėdama plėstis iš inercijos Mūsų Visata plėtėsi taip greitai, Hablo konstantos skaitmeninė vertė buvo tokia didelė, kad vos 10^{-8} cm nuotolio perskirtos sritys viena nuo kitos tolo jau beveik šviesos greičiu. Net ir hadronų eros pabaigoje, plėtimuisi labai sulėtėjus, jo tempai dar tebebuvo nepaprastai dideli – pakako 30 km nuotolio, kad tarpusavio tolimo greitis jau siektų šviesos greitį.

Kyla abejonė, ar fizikinis vakuumas pajėgus suteikti tokį energijos kiekį.

kokio reikalauja infliacijos eros hipotezė. Šią abejonę bandoma pašalinti mintimi, kad Mūsų Visata, kaip ir visos kitos galbūt kartu atsiradusios visatos, tik dalį savo energijos gavo iš fizikinio vakuumo. Kitą savo energijos dalį jos gavusios tiesiog *iš ... nieko*! Juk atsirandant teigiamo ženklo energijai (tai ir su dalelių mase susijusi energija, ir šiluminė energija, ir fotonų bei kitokių laukų energija, ir Visatos plėtimosi kinetinė energija), kartu atsiranda ir neigiamo ženklo gravitacinė energija, galbūt kompensuojanti bent dalį teigiamosios energijos. Fizikinis vakuumas, matyt, reikalingas ne tik kaip energijos tiekėjas, bet ir kaip katalizatorius, sudarantis galimybę atsirasti didžiuliams, tačiau vienas kitą kompensuojantiems priešingų ženklų energijos kiekiams.

Optimistai mano, kad infliacijos eros hipotezė išsprendžia visas **9.6** poskyryje suminėtas, taip pat ir kai kurias kitas panašaus pobūdžio, tačiau ten neaptartas problemas. Štai horizonto problemą puikiai išsprendžia daug greitesnis už šviesą pūtimasis, singuliarinio taško galbūt nebereikia, Visatos plėtimuisi pradžią matyt duoda fizikinio vakuumo stūmos jėga. Ji lemia ir plėtimosi simetriškumą. Kolosalus Mūsų Visatos išsipūtimas infliacijos eros metu sąlygoja Visatos plokštumą, kitaip sakant, euklidinį jos geometrijos pobūdį ($\Omega = 1$). Mažytės tankio ir temperatūros fliuktuacijos, atsiradusios infliacijos eros pabaigoje, o medžiagos eros pradžioje labai išaugusios ir davusios pradžią galaktikoms bei jų sistemoms, aiškinamos infliacijos eros trukmės, fizikinio vakuumo išsisėmimo laiko ir aplinkybių mažytėmis fliuktuacijomis, atsiradusiomis dėl erdvės ir laiko kvantinės prigimties.

9.7.3.1. Chaotiškosios infliacijos hipotezė

Dalis kosmologijos specialistų samprotauja, kad infliacijos erai prasidėti nebūtinas išankstinis medžiaginės materijos buvimas ir fazinis virsmas joje. Jų kuriami modeliai teigia, kad infliacijos era – tai ir yra pats Didysis Sprogimas, pati pirmoji era Mūsų Visatos istorijoje.

Šitokią hipotezę pirmasis 1983 m. paskelbė A. Lindė. Tai vadinamoji ***chaotiškosios infliacijos*** hipotezė. Pagal ją naujos visatos, kaip vis nauji besiplečiantys erdvėlaikio burbulai, spontaniškai atsiranda tiesiog iš amžinai neramaus fizikinio vakuumo.

Dar neaišku, koks Mūsų Visatai atsirandant buvo fizikinio vakuumo tankis. Galbūt jį nusako Planko tankis $\rho_{Pl} \approx 5 \cdot 10^{96}$ kg·m^{-3}, pateiktas (**9.4**) sąryšyje. Tokiame vakuume jo energijos sąskaita turėtų vis atsirasti realiųjų elementariųjų dalelių. O vakuumas tuojau pat jas vėl verčia savo dalimi. Tačiau egzistuoja nors ir nepaprastai maža tikimybė realiosioms dalelėms išsilaikyti – kaip sakoma kvantinėje teorijoje, pralįsti pro tunelį potencialiniame barjere. Kai šitaip atsitiko su būsimosios Mūsų Visatos materijos dalimi, pradžioje tilpusia galbūt vos Planko ilgio (10^{-35}–10^{-34}m) matmenų tūryje, tai ir buvo Mūsų Visatos atsiradimo pradžia, pats Didysis Sprogimas.

Prasidėjęs realiųjų elementariųjų dalelių, sąveikų tarp jų ir fizikinių laukų kūrimosi procesas pasidarė visuotinis, o jau minėta milžiniška vakuumo stūmos jėga ėmė kolosaliai plėsti besikuriančią erdvę, joje paskleisdama naujai atsirandančią medžiagos bei laukų formos materiją. Begimstanti Mūsų Visata pradėjo katastrofiškai greitėdama pūstis, jai ėmė galioti de Siterio sprendinys (**9.38**).

Panašu, kad tai truko 10^{-35} s. Per šį laiką fizikinio vakuumo tankis, pradžioje laikęsis beveik pastovus, galiausiai nukrito beveik iki nulio. O vidutinė tankio vertė galbūt buvo 10^{93} kg·m^{-3}. Tai įrašę į (**9.38**), gauname:

$$R = R_0 e^{7{,}5 \cdot 10^{41} \cdot t} = R_0 e^{7{,}5 \cdot 10^{41} \cdot 10^{-35}} = R_0 \cdot 10^{3\,000\,000}. \qquad (\mathbf{9.39b})$$

(**9.39a**) ir (**9.39b**) palyginimas rodo, kad išsipūtimo mastai yra neapsakomai didesni, jei infliacijos būsenon fizikinis vakuumas patenka būdamas didesnio tankio.

Ypač didelis išsipūtimas (**9.39b**) atveju leidžia manyti, kad infliacijos eroje iš fizikinio vakuumo susikūrė ne viena Mūsų Visata, o iš karto didžiulė daugybė visatų. Jos greitai atsidūrė nepaprastai toli viena nuo kitos ir ėmė plėstis savarankiškai ir izoliuotai. Kiekvienoje tokioje visatoje galbūt susidarė vis kitokių elementariųjų dalelių, sąveikų tarp jų ir fizikinių konstantų rinkinys, kitokia geometrija, net kitoks erdvės matmenų skaičius.

Jei infliacijos era buvo pati pirmoji Mūsų Visatos istorijos era, pats Didysis Sprogimas, tai tiesiog nebeliko laiko nišos universaliosios sąveikos erai. Atrodo, kad šios sąveikos veikimo laikas sutapo su infliacijos veikimo laiku – jie abu baigėsi po 10^{-35}s. O vėliau: vietoje universaliosios sąveikos – dvi atskiros sąveikos (stiprioji ir elektrosilpnoji), vietoje eksponentiškai greitėjančio – lėtėjantis Mūsų Visatos plėtimasis. Tai jau kita, elektrosilpnosios sąveikos era.

9.7.4. Elektrosilpnosios sąveikos era

Pagal **9.7.3.1** skirsnelyje aprašytąją chaotiškosios infliacijos hipotezę ji prasidėjo nuo Mūsų Visatos egzistavimo pradžios praėjus 10^{-35}, o pagal **9.7.2** ir **9.7.3** skyreliuose aprašytąją tradicinę versiją – praėjus 10^{-32}s. Jos trukmė – iki 10^{-10}s.

Šios eros metu gravitacinė ir stiprioji sąveika jau veikė atskirai, tuo tarpu elektromagnetinė ir silpnoji sąveika buvo susijungusios į vieningą ***elektrosilpnąją sąveiką.*** Taip buvo todėl, kad silpnosios sąveikos nešėjai W^+, W^- ir Z^0 bozonai, kaip ir visos kitos elementariosios dalelės vis dar neturėjo rimties masės, taigi tebebuvo panašios į fotonus.

Praėjus maždaug 10^{-10}s, besiplečiančios Mūsų Visatos temperatūra nukrito iki 10^{15} K, tankis sumažėjo iki 10^{29}–10^{28} kg·m^{-3}, nuotoliai tarp dalelių išaugo iki 10^{-18}–10^{-17} m. Visatoje įvyko dar vienas fazinis virsmas. Padedami Hig-

so laukų, rimties masę įgijo kvarkai, elektronai, miuonai, tauonai. Greičiausiai mažučiukę, daug mažesnę už elektrono rimties masę gavo ir neutrinai. Tačiau ji dar nėra patikimai išmatuota. Manoma, kad įvairaus dydžio rimties masę gavo ir visos ar bent daugelis minėtųjų hipotetinių dalelių (WIMP'ų), kurios sąveikauja beveik vien tik gravitacijos būdu. Kartu su visomis šiomis dalelėmis didelę rimties masę gavo ir silpnosios sąveikos nešėjai W^+, W^- ir Z^0 bozonai ($m_w\pm$ = 81 GeV, m_z = 93 GeV). Dėl to buvusi vieninga toliasiekė elektrosilpnoji sąveika išsiskyrė į **silpnąją** ir **elektromagnetinę sąveikas**. Silpnoji sąveika pasidarė trumpo nuotolio, nes jos nešėjai tapo masyvūs. Elektromagnetinė sąveika liko toliasiekė, nes jos nešėjai virtualieji fotonai, kaip ir visi fotonai, liko be rimties masės. Be rimties masės liko ir stipriosios sąveikos nešėjai gliuonai. Taip baigėsi elektrosilpnosios sąveikos viešpatavimo era.

Kai kurie teoriniai modeliai aprašo labai masyvius, nepaprastai koncentruotus materijos telkinius, kurie, lyg kažkokie topologiniai defektai, matyt, susiformavo skylant universaliajai sąveikiai, o gal ir šiek tiek vėliau, pavyzdžiui, elektrosilpnosios eros pabaigoje, kai skilo elektrosilpnoji sąveika. Pasak modelių, tokie telkiniai – tai įvairiomis kryptimis nusidriekusios „stygos" ir „sienos", kurių ilgis – tūkstančiai parsekų ar dar daug daugiau, o storis – galbūt vos 10^{-30}–10^{-32} m. Dalis šių ***kosmologinių stygų*** ir ***sienų*** galėjo išlikti ir iki pirmykščio kosmologinio debesies fragmentavimosi epochos ir daug prisidėti prie galaktikų bei jų sistemų formavimosi (žr. **8.7** poskyrį).

Ankstyvosiose Mūsų Visatos raidos erose galėjo susidaryti ir įvairios, net visiškai mažos masės juodosios bedugnės, kurių dalis galbūt taip pat vėliau turėjo įtakos žvaigždžių ir galaktikų atsiradimui.

9.**7**.**5**. Kvarkų ir gliuonų plazmos era

Ji tęsėsi nuo 10^{-10}s iki 10^{-7}s. Jos metu temperatūra nukrito iki $3{\cdot}10^{13}$ K, tankis sumažėjo iki $5{\cdot}10^{22}$ kg·m^{-3}. Visą laiką kvarkai ir leptonai, taip pat, matyt, ir WIMP'ai vis anihiliuodavo su savo antidalelėmis. O galingų gama fotonų energijos pakako visų dalelių su savo antidalelėmis poroms vėl iš naujo atstatinėti. Tuo būdu koks elementariųjų dalelių skaičius susidarė infliacijos eroje, toks jis išliko ir visose vėlesnėse erose iki pat hadronų eros (žr. **9.7.6**) pabaigos.

Atrodytų, kad visą laiką turėjo būti visiška simetrija tarp visų rūšių dalelių ir jų antidalelių gausos. Juk iš gama fotonų visada susidaro dalelės ir jos antidalelės pora. Tačiau šią griežtą simetriją truputėlį suardė X ir Y bozonai. Buvo sukurti teoriniai modeliai, kurie parodo, kaip X ir Y bozonai, sąveikaudami su kvarkais ir leptonais bei jų antidalelėmis, kai kuriais retais atvejais antidalelių sąskaita padidina dalelių skaičių.

Tiesa, X ir Y bozonai baigiantis universaliosios sąveikos erai išnyko. Vis tik negausūs jų ir jų antidalelių kiekiai virtuališkai atsirasdavo ir vėliau, matyt, įskaitant kvarkų ir gliuonų plazmos erą, o gal ir hadronų erą. X ir Y bozonams veikiant maždaug milijardui ar dešimčiai milijardų, o gal šimtui milijonų antikvarkų pradėjo tekti ne lygiai toks pat, o vienetu didesnis kvarkų skaičius. Tas pats ir su leptonais. Pavyzdžiui, kiekvienam milijardui pozitronų ėmė tekti vienetu daugiau elektronų. Atsiradimas šios, nors ir labai nedidelės asimetrijos tarp dalelių ir antidalelių skaičiaus buvo nepaprastai svarbus įvykis, lėmęs tolesnę Mūsų Visatos būklę.

9.7.6. Hadronų era

Ji truko nuo 10^{-7} s iki 10^{-4} s. Per šį laiką temperatūra sumažėjo nuo $3{\cdot}10^{13}$ K iki 10^{12} K, o tankis – nuo $5{\cdot}10^{22}$ kg·m^{-3} iki $5{\cdot}10^{16}$ kg·m^{-3}.

Per 10^{-7}–10^{-5} s nuotoliai tarp dalelių išaugo iki 10^{-16}–10^{-15} m. Dėl to suskilo iki tolei buvusi ištisinė kvarkų jūra – kvarkai (ir antikvarkai) susigrupavo po tris arba po du. O juk trijų kvarkų sistema – tai **barionas**, o kvarko ir antikvarko sistema – tai **mezonas**. Taip Mūsų Visatoje pagaliau atsirado **hadronai** – įvairūs hiperonai, neutronai, protonai, įvairūs mezonai. Anksčiau hadronai negalėjo egzistuoti, nes jiems buvo tiesiog per ankšta – atstumai tarp kvarkų ištisinėje kvarkų jūroje buvo mažesni, negu turėtų būti hadronų viduje.

Pagaliau, praėjus maždaug 10^{-4} s, Mūsų Visatos temperatūra sumažėjo iki 10^{12} K. Fotonų energijos pradėjo nebepakakti hadronų ir antihadronų poroms susidaryti. Vadinasi, hadronų ir leptonų anihiliacija tęsėsi, o atvirkštinis veiksmas hadronams sparčiai blėso. Anihiliacijos naikinami, hadronai ir antihadronai pradėjo nebeatsikurti. Jų sparčiai mažėjo. Taip baigėsi hadronų era. Todėl greitai daugėjo anihiliacijos sukuriamų gama fotonų. Jei hadronų skaičius būtų buvęs visiškai lygus antihadronų skaičiui, anihiliacija būtų juos visus sunaikinusi, pavertusi fotonais. Šiandien nebūtų nei protonų, nei neutronų. Vadinasi, nebūtų ir atomų, žvaigždžių, planetų. Laimei, visiška simetrija tarp dalelių ir antidalelių skaičiaus jau buvo suardyta (žr. **9.7.5**). Todėl kas šimtamilijonasis ar kas milijardasis hadronas išliko – nežuvo anihiliacijos siautulyje, nes jam nebeužteko poros – antihadrono. Iš šių laimingųjų tarpo iki vėlesnių erų išsilaikė ir atomų sudėtyje atsidūrė tik stabilieji hadronai – protonai ir neutronai.

Maždaug kartu su hadronų bei antihadronų poromis po anihiliacijos nustojo atsikurti ir tauonų bei jų antidalelių poros. Mat jų rimties masė daug didesnė už kitų leptonų rimties masę ir maždaug prilygsta hadronų masei – ji beveik du kartus didesnė už protono rimties masę. Negausūs tauonų likučiai, kuriems anihiliuoti nebeužteko antitauonų, dėl savo nestabilumo greitai išnyko, virto lengvesniais leptonais ir fotonais. Mūsų Visatoje liko vyrauti

kitų, lengvesnių leptonų bei jų antidalelių poros, taip pat anihiliacijos sukurti labai gausūs gama fotonai. Taip hadronų erą pakeitė kita, vadinamoji leptonų era.

9.7.7. Leptonų era

Ji tęsėsi nuo 10^{-4} s iki 10 s. Per šį laiką temperatūra nukrito nuo 10^{12} K iki $3 \cdot 10^{9}$ K, tankis sumažėjo nuo 10^{16}–10^{17} kg·m^{-3} iki 10^{6}–10^{7} kg·m^{-3}.

Beveik pačioje šios eros pradžioje, nuo Mūsų Visatos egzistavimo pradžios praėjus 10^{-3} s ir temperatūrai nukritus iki $3 \cdot 10^{11}$ K, fotonų energijos pradėjo nebeužtekti anihiliacijos naikinamoms miuonų ir antimiuonų poroms atkurti. Taigi ir miuonus ištiko toks pat likimas, kaip šiek tiek anksčiau tauonus. Miuonų anihiliacija ženkliai papildė hadronų ir tauonų anihiliacijos jau sukurtų fotonų skaičių.

Praėjus maždaug 0,01 s ir tankiui sumažėjus iki 10^{12}–10^{13} kg·m^{-3}, o temperatūrai iki 10^{11} K, tauoniniai neutrinai dėl silpnosios sąveikos lėtumo ir Mūsų Visatos plėtimosi greitumo pradėjo nebespėti sąveikauti su kitomis dalelėmis, taip pat anihiliuoti su savo antidalelėmis. Labai greitai tas pats atsitiko ir su miuoniniais neutrinais. Dar maždaug po 0,2–0,3 s – ir su elektroniniais neutrinais. Visata pasidarė beveik skaidri visiems neutrinams ir antineutrinams.

Nuo to laiko neutrinų ir antineutrinų visuma plečiasi savarankiškai ir su kitais Visatos komponentais susijusi tiktai dėl gravitacijos. Jų visumos temperatūra dėl plėtimosi nuolatos žemėja, visą laiką likdama atvirkščiai proporcinga Visatos spinduliui R. (Vietoj Visatos spindulio gali būti ir nuotolis tarp bet kokių dviejų objektų, Visatai plečiantis tolstančių vienas nuo kito. Jis irgi žymimas tuo pačiu simboliu R.) Taigi $T \sim (1/R)$. Dabar ši temperatūra jau turėtų būti sumažėjusi maždaug iki 2 K.

Tokius neutrinus ir antineutrinus vadiname ***reliktiniais*** arba ***kosmologiniais***, nes jie likę iš leptonų eros. Reliktinių neutrinų ir antineutrinų turėtų būti nepaprastai daug – net $10^{9\pm1}$ kartų daugiau negu nukleonų. Juk nukleonų išliko tik likučiai, neradę sau poros anihiliacijai, kai neutrinai išliko praktiškai visi.

Jei neutrinai turi rimties masę ir ji už protono rimties masę mažesnė ne daugiau kaip maždaug 10^{8} kartų, tai visų Mūsų Visatos reliktinių neutrinų rimties masė yra didesnė už visų nukleonų rimties masę. Jeigu tai tiesa, logiška galvoti, kad bent dalį galaktikas gaubiančios nematomosios medžiagos (žr. **8.1**) kaip tik ir sudaro šie reliktiniai neutrinai su antineutrinais.

Atsiskyrus neutrinams su antineutrinais, dar kurį laiką elektronai su pozitronais vis anihiliuodavo, pagamindami labai daug naujų gama fotonų. Savo ruožtu žūdami gama fotonai vis dar sukurdavo naujas elektronų ir pozitronų poras. Galiausiai beveik po 10 s, kai temperatūra krito žemiau 3–5 milijardų laipsnių, fotonų energijos pradėjo nebeužtekti jau ir elektronų su pozitronais

poroms sukurti. Pozitronai greitai išnyko. Skurdūs elektronų likučiai, kuriems pritrūko pozitronų anihiliacijai, savo skaičiumi susilygino su protonų likučiais. Mūsų Visata išliko elektriškai neutrali. Taip baigėsi leptonų era ir prasidėjo spindulių era. Mūsų Visatos tankis tuomet buvo $5 \cdot 10^6$ kg·m^{-3}.

9.7.8. Spindulių era

Matome, kad hadronų ir leptonų erų metu vienos po kitų dėl anihiliacijos išnyko visų rūšių antidalelės. O dalelių likučiai anihiliacijos išvengė. Neanihiliavo, o išsiskyrė vien neutrinų ir antineutrinų poros. Vykstant anihiliacijai, atsirado daugybė gama fotonų. Jų skaičius po visų anihiliacijų pasidarė $10^{9\pm1}$ kartų didesnis už dalelių likučių – nukleonų ir elektronų – skaičių. Dabar šie buvę gama fotonai yra pavirtę radijo ir submilimetriniais fotonais. Jie vadinami ***reliktiniais fotonais***. Jų atradimas ir detalus tyrimas buvo ir tebėra labai naudingas nagrinėjant Visatos kilmę, raidą ir sandarą. Todėl jų aprašymui skirsime atskirą **9.9** poskyrį. Jame pamatysime, kaip ir kodėl ilgainiui mažėja kiekvieno reliktinio fotono energija ir masė, kodėl jie iš gama fotonų palaipsniui virto radijo fotonais.

Dėl visuotinės elektronų ir pozitronų anihiliacijos, baigiantis leptonų erai, fotonų visumos temperatūra tapo aukštesnė negu neutrinų visumos temperatūra. Todėl dabar reliktinių fotonų temperatūra yra 2,728 K, o reliktinių neutrinų imant apytiksliai – vos 2 K. Kaip rodo (**9.52**), dabar reliktinių fotonų masės tankis $\rho_{f0}= 4{,}661 \cdot 10^{-31}$ kg·m^{-3}, kai dabartinės visos medžiagos (ir matomosios, ir nematomosios) masės tankis $\rho_{m0}= 3{,}4 \cdot 10^{-27}$ kg·m^{-3} (žr. **9.3.2** ir **9.3.4** skirsnelius). Taigi dabar reliktinių fotonų masė 7300 kartų mažesnė už visos medžiagos masę.

O anuomet, tik ką pasibaigus leptonų erai, fotonų temperatūra buvo $3{,}2 \cdot 10^9$ K, taigi $1{,}2 \cdot 10^9$ kartų aukštesnė negu dabar. Fotonai tuomet buvo 1,2 milijardo kartų trumpesnių bangų ir tiek pat kartų didesnės energijos bei masės. Vadinasi, Mūsų Visatos visų fotonų masė buvo net $4{,}661 \cdot 10^{-31} \cdot 1{,}2 \cdot 10^9 \cdot 10^{27} : 3{,}4 \approx 1{,}6 \cdot 10^5$ kartų didesnė už visos medžiagos rimties masę.

Taigi pasibaigus leptonų erai, fotonų masė sudarė pagrindinę Mūsų Visatos masės dalį. Vadinasi, Visatos struktūrą tuomet lėmė fotonų materijos sukurta traukos jėga. Todėl leptonų erą pakeitusi era ir pavadinta spindulių era. Jos pradžioje keletą minučių masiškai vyko branduolinės reakcijos, kurių pagrindinis rezultatas – helio atsiradimas Mūsų Visatoje. Šiam labai svarbiam įvykiui skirtas atskiras **9.8** poskyris.

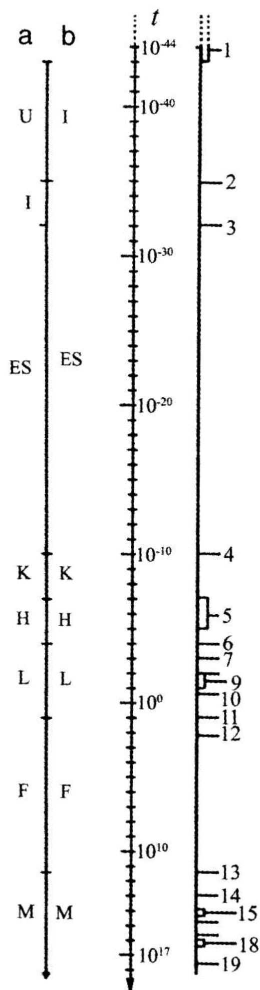
Spindulių era truko apie 8 tūkstančius metų. Per tą laiką Mūsų Visatos temperatūra pažemėjo $1{,}6 \cdot 10^5$ kartų ir nukrito iki 20 000 K. Kartu $1{,}6 \cdot 10^5$ kartų sumažėjo ir kiekvieno reliktinio fotono energija bei masė (žr. **9.9.3** skirsnelį). Todėl reliktinių fotonų masės tankis ρ_f pagaliau pasidarė ne didesnis už medžiagos masės tankį ρ_m. Būtent pasidarė $\rho_f = \rho_m = 1{,}3 \cdot 10^{-15}$ kg·m^{-3}. Tai

jau spindulių eros pabaiga ir kartu medžiagos eros pradžia. Mūsų Visata tuo metu dar tebebuvo jonizuotas kosmologinis debesis, panašaus tankio į dabartinius tankiausius tarpžvaigždinius molekulinius debesis.

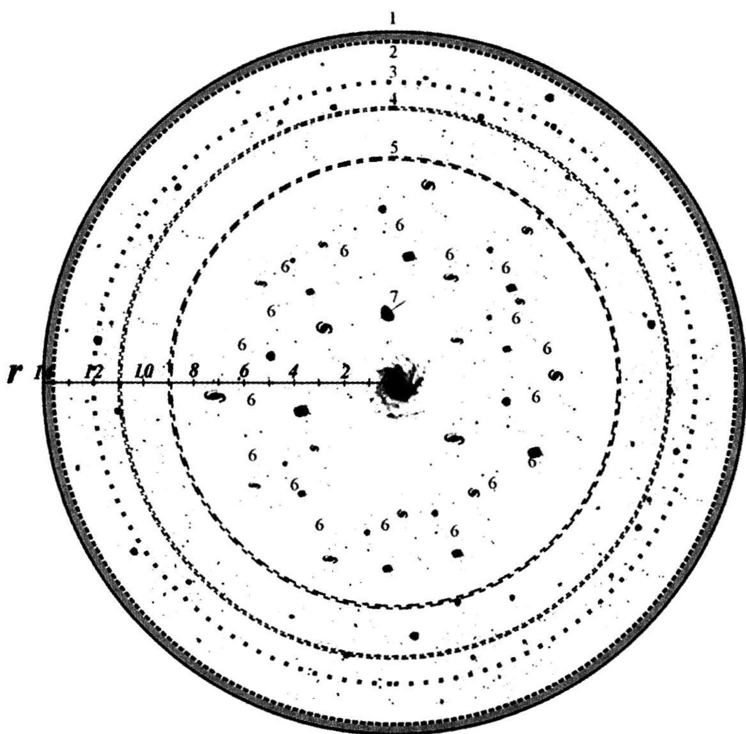
9.7.9. Medžiagos era

Šios dar ir dabar tebesitęsiančios eros pavadinimas atspindi tą faktą, kad reliktinių fotonų masė jau mažesnė už medžiagos masę. Kuo vėlesnis laikas, tuo didesnė nelygybė $\rho_f < \rho_m$. Šios eros pradžia yra svarbus persilaužimo momentas Mūsų Visatos raidoje. Nuo to laiko Visatos struktūrą ėmė lemti nebe fotonų, o medžiagos sukurta gravitacijos jėga. Palaipsniui atsirado galimybė augti tankio fliuktuacijoms. O tai ilgainiui pasibaigė galaktikų, žvaigždžių, planetų, gyvybės, mūsų civilizacijos (gal ir daugelio kitų civilizacijų) atsiradimu.

Medžiagos eroje įvyko du labai reikšmingi įvykiai.



9.4 pav. *Mūsų Visatos raidos schema. t – Mūsų Visatos amžius sekundėmis. Raidos eros (a – laikantis tradicinės versijos, b – laikantis chaotiškosios infliacijos hipotezės): U – universaliosios sąveikos era, I – infliacijos era, ES – elektrosilpnosios sąveikos era, K – kvarkų ir gliuonų plazmos era, H – hadronų era, L – leptonų era, F – spindulių era, M – medžiagos era. 1 (0–10^{-43}s) – Planko epocha. 2 (10^{-35}s) – X, Y ir kai kurie kiti bozonai – universaliosios sąveikos nešėjai – įgijo rimties masę, universalioji sąveika suskilo į stipriąją ir elektrosilpnąją sąveikas, pagal a versiją prasidėjo, o pagal b versiją pasibaigė infliacijos era. 3 (10^{-32} s) – infliacijos eros pabaiga pagal a versiją. 4 (10^{-10}s) – elektrosilpnosios sąveikos eros pabaiga, rimties masę įgijo kvarkai, leptonai, WIMP'ai, W^+,W^-, Z^0 bozonai, išsiskyrė elektromagnetinė ir silpnoji sąveikos. 5 (10^{-7}–10^{-5}s) – kvarkai susigrupavo į hadronus. 6 (10^{-4}s) – fotonų energijos nebeužteko anihiliacijos išnaikintiems hadronams ir tauonams atkurti. 7(10^{-3}s) – fotonų energijos nebeužteko anihiliacijos išnaikintiems miuonams atkurti. 8 (10^{-2} s) – atsiskyrė ν_τ. 9 (10^{-2}–10^{-1} s) – atsiskyrė ν_μ. 10 (0,2–0,3 s) – atsiskyrė ν_e. 11(10 s) – fotonų energijos nebeužteko anihiliacijos išnaikintiems elektronams atkurti. 12 (2–5 minutės) – He ir sunkesnių branduolių gamyba. 13 (8000 metų) – fotonų masės tankis sumažėjo iki medžiagos masės tankio. 14 (3–4)·10^5 m.) – rekombinavo kosmologinė plazma, fotonai atsiskyrė nuo medžiagos. 15 (2–8)·10^6 m.) – Mūsų Visatoje praktiškai nebeliko regimosios šviesos fotonų, prasidėjo tamsos epocha. 16 (1–2)·10^7m.) – kosmologiniame debesyje išryškėjo lėčiau besiplečiančios, didesnio tankio sritys. 17 (1–2)·10^8 m.) – didesnio tankio sritys visiškai nustojo plėstis ir pradėjo trauktis. 18 (2–7)·10^8 m.) – prasidėjo žvaigždėdara ir galaktikų formavimasis, baigėsi tamsos epocha. 19 (13–15)·10^9 m.) – dabartis*



9.5 pav. *Mūsų Visatos regimosios dalies (Metagalaktikos) struktūra. Centre mūsų Galaktika. r – nuotolis nuo mūsų Galaktikos milijardais šviesmečių. Jis kartu rodo, iš kokio senumo praeities matome atitinkamus objektus. 1 – kosmologinis horizontas ir kosmologinė fotosfera (žr.* **9.9.4** *skirsnelį). (Šiame mastelyje susilieja, tikrovėje fotosfera yra 350 000 šm arčiau horizonto). 2 – žvaigždžių ir galaktikų formavimosi pradžia. 3 – maksimalios kvazarų gausos zona. 4 – būsimųjų S ir SO galaktikų diskų formavimosi pradžia. 5 – S galaktikų spiralinių vijų formavimosi pradžia. 6 – pradeda sparčiai mažėti veikiančių kvazarų skaičius. 7 – artimiausias žinomas (ilgiausiai išlikęs) kvazaras.*
Šiapus kosmologinės fotosferos, milijonu ar keliais milijonais šm arčiau prasideda kelių šimtų milijonų šm storio tamsos žiedas (erdvėje sluoksnis). Jame esančios šaltos H ir He atomų dujos neskleidžia regimosios šviesos ir artimųjų IR spindulių. Galiausiai tamsą panaikina pradėjusios formuotis pirmosios žvaigždės.
Mūsų Visata yra daug kartų didesnė už čia pavaizduotą jos regimąją dalį. Tokią pat regimosios Visatos dalies struktūrą (su savąja galaktika centre) matytų ir bet kurioje kitoje Mūsų Visatos vietoje esąs stebėtojas

Pirmiausia – visuotinė atomų rekombinacija, kosmologinę plazmą pavertusi neutraliu kosmologiniu debesiu ir tuo būdu leidusi nuo medžiagos atsiskirti reliktiniams fotonams, jiems tapti tikrai reliktiniais. Apie tai rašoma **9.9.4** skirsnyje. Vėliau – kosmologinio debesies pavirtimas galaktikomis ir jų sistemomis. Apie tai rašoma **8.7.1** skirsnyje.

9.8. ATOMŲ BRANDUOLIŲ GAMYBA KOSMOLOGINIAME DEBESYJE SPINDULIŲ EROS METU

Pačioje leptonų eros pradžioje buvo maždaug po vienodą skaičių masinės anihiliacijos išvengusių protonų ir neutronų. Tačiau labai aktyviai vyko šios silpnosios sąveikos reakcijos:

$$n + e^+ \leftrightarrow p + \bar{\nu}_e \quad \text{ir} \quad n + \nu_e \leftrightarrow p + e^-. \qquad (9.40)$$

Čia n – neutronas, p – protonas, e^- – elektronas, e^+ – pozitronas, – ν_e elektroninis neutrinas, $\bar{\nu}_e$ – elektroninis antineutrinas. Kadangi neutrono masė truputį didesnė už protono masę, tai greičiau vyksta tos reakcijos, kurias nurodo dešinėn nukreiptos rodyklės. Todėl neutronų skaičius ėmė mažėti, o protonų – didėti. Po kelių sekundžių, maždaug įpusėjus leptonų erai, (9.40) reakcijos labai sulėtėjo ir galiausiai beveik nutrūko – pasidarė per žema Visatos temperatūra, taip pat nustojo aktyviai veikti reliktiniais tapę neutrinai. Nusistovėjo maždaug pastovus neutronų ir protonų skaičių santykis – apie 12–15% neutronų ir 85–88% protonų. Šis santykis beveik nekito daugiau kaip šimtą sekundžių – jau prasidėjus ir spindulių erai.

Per visą šį laiką neutronai vis jungdavosi su protonais, sudarydami sunkiojo vandenilio ^{2}H, dar vadinamo deuteriu ir žymimo D, branduolius:

$$p + n \leftrightarrow D + \gamma. \qquad (9.41)$$

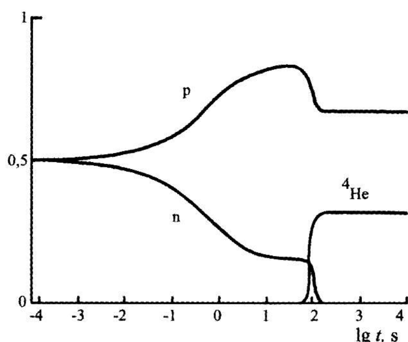
Tačiau labai gausūs ir vis dar labai galingi gama fotonai tuojau pat suskaldydavo kiekvieną atsiradusį D branduolį.

Šiam skaldymui jie pagaliau pristigo energijos tiktai tuomet, kai temperatūra nukrito žemiau milijardo laipsnių. Tai įvyko praėjus 1,5 minutėms po Didžiojo Sprogimo. Nuo to laiko laisvų neutronų skaičius vėl ėmė sparčiai mažėti. Tačiau D branduolių atsargų nedaug tesusikaupė, nes atsiradę D branduoliai tuojau pat tapo žaliava tolesnėms branduolinėms reakcijoms:

$$D + D \leftrightarrow T + p, \quad D + D \leftrightarrow {}^3He + n,$$
$$^3He + n \leftrightarrow T + p, \quad T + D \leftrightarrow {}^4He + n. \qquad (9.42)$$

(9.41) ir (9.42) reakcijos tęsėsi tik apie dvi minutes – kol nepritrūko laisvų neutronų. Šių reakcijų tikimybių santykiai yra tokie, kad lengvojo helio ^{3}He ir tričio ^{3}H, dar žymimo T (susidedančio iš vieno protono ir dviejų neutronų), branduolių atsirado visiškai nedaug. Labai mažai išliko ir deuterio D branduolių, išvengusių žūties (9.42) reakcijose. Taigi beveik visi buvę laisvi neutronai atsidūrė ^{4}He branduolių sudėtyje. Tričio branduoliai, būdami radioaktyvūs, iki mūsų dienų neišliko.

Lėtai ir negausiai dar vyko ir šios branduolinės reakcijos: $^4He + T \rightarrow {}^7Li + \gamma$, $^4He + {}^3He \rightarrow {}^7Be + \gamma$, $^7Be + e^- \rightarrow {}^7Li + \nu_e$, prigaminusios šiek tiek ličio ir berilio. Taip pat mažais kiekiais buvo pagaminta ir dar sunkesnių branduolių.

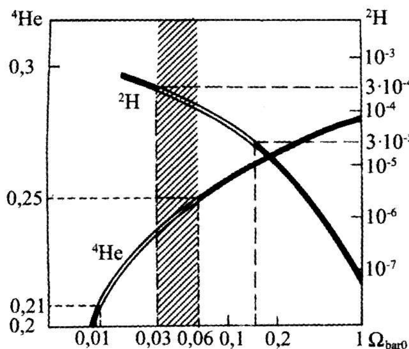


9.6 pav. *Protonų p, neutronų n ir helio branduolių ^4He santykinės gausos kitimas vykstant (**9.40**)–(**9.42**) branduolinėms reakcijoms. t – Mūsų Visatos amžius sekundėmis*

Didesnei vidutinių ir sunkesnių branduolių įvairovei ir gausesniam jų kiekiui kosmologiniame debesyje susidaryti sutrukdė labai greitas Mūsų Visatos temperatūros, o ypač tankio sumažėjimas dėl jos tada vykusio žaibiško plėtimosi. Taip pat sutrukdė ir ta aplinkybė, kad iš penkių ir aštuonių nukleonų susidedantys branduoliai yra labai nestabilūs, tuojau pat suskyla.

Kosmologiniame debesyje susidariusių ^4He branduolių masę procentais apskaičiuojame labai paprastai – ten buvusių laisvųjų neutronų procentinį kiekį (12–15%) padauginame iš 2. Juk ^4He branduoliuose protonų yra kita tiek, kiek ir neutronų. Taigi praėjus 4–5 minutėms nuo Mūsų Visatos pradžios kosmologiniame debesyje vietoj protonų ir neutronų mišinio atsirado protonų ir helio branduolių mišinys, kuriame helio branduoliai ėmė sudaryti 24–30% masės, o protonams liko 76–70% masės.

Kaip tiktai šitokią Metagalaktikos cheminę sudėtį rodo mūsų stebėjimai. O tai reiškia, kad mūsų samprotavimai apie leptonų erą neturėtų daug skirtis nuo tikrovės.



9.7 pav. *(**9.40**)–(**9.42**) reakcijose prigamintų ^2H ir ^4He branduolių santykinės gausos teorinė priklausomybė nuo Ω_{bar0}. Tuščiavidurės šių kreivių atkarpos – stebėjimų rezultatams neprieštaraujančios ^4He ir ^2H gausos verčių sritys. Sugretinus abi kreives, gaunama užbrūkšniuota sritis, nurodanti galimas Ω_{bar0} vertes tarp 0,03 ir 0,06. Tai vienas iš nepriklausomų metodų Ω_{bar0} vertei nustatyti*

Pavyzdžiui, jei Mūsų Visatoje, be jau žinomų trijų neutrinų rūšių, egzistuotų dar ir daugiau neutrinų rūšių arba kokių nors kitokių kol kas neaptiktų silpnai sąveikaujančių leptonų, temperatūra leptonų eroje būtų žemėjusi daug greičiau, vadinasi, ir (**9.40**) reakcijos būtų aktyviai veikusios daug trumpesnį laiką. Dėl to mažesnis neutronų procentas būtų suspėjęs virsti protonais, (**9.41**) ir (**9.42**) reakcijos būtų prigaminusios daug daugiau ^4He branduolių. Visatoje vyrautų ne vandenilis, o helis.

Kitas pavyzdys. Jei kosmologinių neutrinų būtų daug daugiau negu antineutrinų, (**9.40**) reakcijos būtų suspėjusios praktiškai visus neutronus paversti protonais. Dėl to nebūtų vykusios (**9.41**)

ir (**9.42**) reakcijos. Helio dabar būtų tik tiek, kiek jo prigamino žvaigždės. O žvaigždės tesuspėjo prigaminti vos 0,05 jo stebimojo kiekio.

(**9.41**) reakcijų prigaminto ir, išvengiant (**9.42**) reakcijų, iki mūsų dienų išlikusio deuterio kiekis taip pat yra svarbus stebėjimų duomuo, padedantis nušviesti Mūsų Visatos istoriją. Juk šis kiekis labai jautriai priklausė nuo to, kiek kartų kosmologiniame debesyje fotonų skaičius buvo didesnis už nukleonų skaičių. Kuo daugiau fotonų tenka vienam nukleonui, tuo daugiau išliko D branduolių, nepatekusių į ^{4}He sudėtį. Stebėjimai rodo, kad deuterio atomų yra keliomis dešimtimis tūkstančių kartų mažiau negu normalaus vandenilio izotopo atomų. Tai reiškia, kad vienam nukleonui turėtų tekti milijardas ar du milijardai fotonų. **9.9.2** ir **9.9.3** skirsniuose nurodoma, kad dešimtyje m^3 dabar aptinkama $4 \cdot 10^9$ reliktinių fotonų. Taigi reliktinio deuterio kiekis rodytų, kad tame pačiame tūryje dabar turėtų vidutiniškai būti du ar trys nukleonai. Ši išvada neblogai dera su kitais nepriklausomais metodais nustatoma ρ_{bar0} verte maždaug $(3–5) \cdot 10^{-28}$ $kg \cdot m^{-3}$. Galima tikėtis, kad šis įvertinimas yra artimas tikrovei arba bent nenukrypsta nuo jos daugiau negu 10 kartų.

9.9. RELIKTINIAI FOTONAI

9.9.1. Kas yra reliktiniai fotonai?

Tai submilimetriniai, mikrobangiai ir ultratrumpabangiai radijo fotonai, sklindantys į mūsų stebėjimo aparatūrą iš viso dangaus, o ne iš kokių nors konkrečių šaltinių. Juos 1965 m. atrado amerikiečiai radijo astronomijos specialistai Arnas Penzijas (*A. A. Penzias*) ir Robertas Vilsonas (*R. W. Wilson*). Pirmieji matavimai parodė, kad šie fotonai iš tokio paties dangaus ploto nepriklausomai nuo savo sklidimo krypties visuomet atneša tiek pat energijos, kurios vertė ir jos pasiskirstymas pagal bangų ilgius paklūsta idealaus spinduolio (absoliučiai juodo kūno) spinduliavimo dėsniams, jei juos nusakančiuose sąryšiuose įrašoma 2,7–2,8 K temperatūros vertė.

Iš šio fakto galima daryti išvadą, kad vadinamieji reliktiniai fotonai užpildo visą Mūsų Visatą, kad jų visuma plečiasi kartu su Visata, visą laiką likdama pusiausvirąja, šiluminės kilmės sistema. Jau anksčiau sukurti teoriniai modeliai rodė, kad turi egzistuoti fotonai, likę iš labai ankstyvų Mūsų Visatos egzistavimo momentų, iš jos ankstyvosios kūdikystės. Tuomet, prieš $(13–15) \cdot 10^9$ metų, jie susidarė visoje anuometinėje labai jaunoje ir karštoje Mūsų Visatoje. Šią hipotezę atspindi ir fotonų pavadinimas „reliktiniai". Jų atradimas puikiai patvirtino šią hipotezę. Vėliau tikslesni ir išsamesni matavimai parodė reliktinių fotonų temperatūros kai kuriuos mažyčius nevienodumus ir jų pasiskirstymą. Apie tai kalbėsime **9.9.6** skirsnelyje.

9.9.2. Reliktinių fotonų sistemos pusiausvirasis pobūdis

Ką tai reiškia? Įsivaizduokime uždarą ertmę idealaus spinduolio viduje. tai yra visiškai uždarą dėžę su neskaidriomis, visą atskriejančią spindulių energiją sugeriančiomis sienelėmis. Jos visuomet spinduliuoja tam tikrą įvairaus ilgio elektromagnetinių bangų rinkinį, kurį nusako Planko dėsnis, pavyzdžiui. sienelių skaisčio spektrinio tankio B_λ priklausomybė nuo sienelių temperatūros T ir nuo λ:

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \qquad (9.43)$$

Sienelių spinduliuojami fotonai užpildo visą mūsų dėžę. Kiekvienu momentu kiekviename vienetiniame dėžės tūryje, pavyzdžiui, viename m^3, yra tam tikras visose dėžės vietose vienodas fotonų skaičius N. Šie fotonai yra įvairių bangos ilgių. Vieno, be galo mažo bangos ilgių intervalo nuo λ iki $\lambda + d\lambda$ fotonų skaičius vienetiniame dėžės tūryje yra dN. Šių fotonų energiją du (iš tikrųjų tai monochromatinės energijos tankis, nes telpa vienetiniame tūryje) gausime, (**9.43**) padauginę iš viso erdvinio kampo 4π (nes fotonai atskrieja iš visų pusių) ir padalinę iš šviesos greičio c, taip pat padauginę iš $d\lambda$:

$$du = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda. \qquad (9.44)$$

Tuomet

$$dN = \frac{\lambda}{hc} du, \qquad (9.45)$$

nes hc/λ yra vieno fotono energija.

Taigi

$$N = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} dN = 8\pi \int_0^\infty \frac{1}{\lambda^4 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} d\lambda. \qquad (9.46)$$

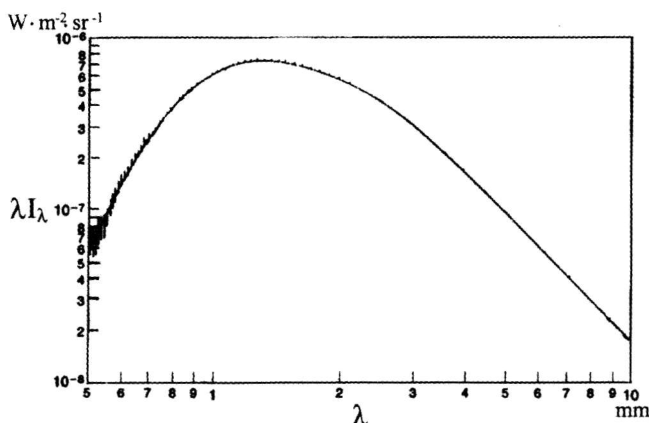
Vienetiniu dėžės tūriu laikant vieną m^3,

$$N = 2{,}028 \cdot 10^7 \cdot T^3. \qquad (9.47)$$

Šių fotonų energija (integralinės energijos tankis)

$$u = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} du = 7{,}56464 \cdot 10^{-16} \cdot T^4 \quad \mathrm{J \cdot m^{-3}}. \qquad (9.48)$$

Matome, kad dėžės vienetiniame tūryje kiekvienu momentu aptinkamų fotonų skaičius $N \sim T^3$, o jų energija $u \sim T^4$, taigi vieno fotono energija $\sim T$. Vidutinė vieno fotono energija $E = u/N = 3{,}73 \cdot 10^{-23} \cdot T$ J. Ji beveik du kartus maž-



9.8 pav. *Reliktinių fotonų energijos kreivė.* λI_λ *– monochromatinis intensyvumas ties bangos ilgiu* λ. *Kitaip sakant – tai monochromatinės spinduliuotės stipris pro vienetinį plotą, t. y. vienetiniame erdviniame kampe sklindančios monochromatinės spinduliuotės srautas pro vienetinį plotą. Vertikaliais brūkšneliais pažymėtos erdvėlaivio COBE (žr.* **9.9.6**) *atliktų matavimų vertės su savo paklaidomis. Ištisinė kreivė – idealiojo spinduolio energijos kreivė, apskaičiuota panaudojus erdvėlaivio COBE nustatytą reliktinių fotonų temperatūrą* $T_f = 2{,}735 \pm 0{,}06$ *K. Remiantis vėlesniais įvairių orbitinių teleskopų matavimais, buvo priimta* $T_f = 2{,}728 \pm 0{,}004$ *K. Idealiojo spinduolio kreivė, apskaičiuota remiantis šia patikslinta temperatūros verte, šiame paveiksle praktiškai nesiskirtų nuo čia pavaizduotosios kreivės*

esnė už Planko kreivės maksimumo (**9.53**) fotonų energiją $E=hc/\lambda_{max}$. Nuotoliai tarp fotonų truputį didesni už λ_{max} ir beveik prilygsta bangų ilgiui tų fotonų, kurie dėžėje sudaro daugumą.

Taigi visas aptariamųjų fotonų sistemos charakeristikas vienareikšmiškai nusako jų temperatūra (mūsų pavyzdyje dėžės sienelių temperatūra). Tai ir yra pusiausvirosios spinduliuotės svarbiausias požymis. Išmatavus kurį nors vieną pusiausvirosios spinduliuotės parametrą, pavyzdžiui, Planko kreivės vieno taško aukštį, galima apskaičiuoti jos temperatūrą, tuo pačiu ir visus kitus duomenis apie šią spinduliuotę.

Tokia reliktinių pusiausvirųjų fotonų pripildyta dėžė ir yra Mūsų Visata. Tik ji neturi sienų, kurių ir nereikia – reliktiniai fotonai, gimę Visatos jaunystėje, taip ir negali niekur iš jos ištrūkti, nes jų visuma plečiasi kartu su Visata.

Kaip nustatoma reliktinių fotonų sistemos temperatūra? Ogi matuojant į radioteleskopo vienetinį plotą per vienetinį laiką patenkančios jų energijos kiekį $J_\nu \cdot \Delta\nu$, telpantį mažame elektromagnetinių virpesių dažnių intervale tarp ν ir $\nu+\Delta\nu$. Tai monochromatinis (ar kvazimonochromatinis) spindesys. Kaip prisimename, spindesio spektrinį tankį J_ν, skaisčio spektrinį tankį B_ν ir erdvinį kampą ω, kuriuo mes matome spinduliavimo šaltinį, sieja ši formulė:

$$J_\nu = \omega B_\nu. \qquad \textbf{(9.49)}$$

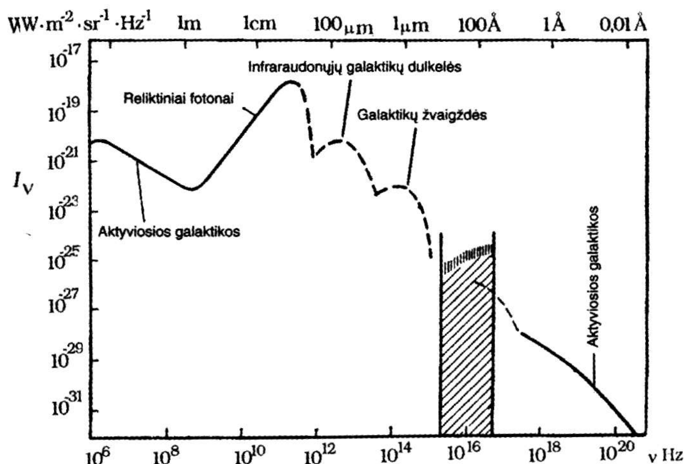
Mūsų atveju ω yra erdvinis kampas, nusakantis, iš kokio dangaus ploto vienu metu registruoja radijo bangas konkretus radioteleskopas. Tai priklauso nuo jo konstrukcijos. Planko dėsnio išraiškoje (**9.43**) B_λ perskaičiavę į B_ν ir įrašę į (**9.49**), gauname galutinį sąryšį tarp išmatuoto reliktinių fotonų spindesio spektrinio tankio J_ν ir norimos apskaičiuoti jų temperatūros T:

$$J_\nu = \frac{\omega 2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}}. \qquad (\mathbf{9.50})$$

Jei Planko dėsnį (9.43) galima pakeisti Reilio ir Džinso dėsniu (6.5), tai

$$J_\nu = \frac{2k\omega}{c^2} T\nu^2. \qquad (\mathbf{9.51})$$

Reliktinių fotonų energijos srauto tankį pavyko išmatuoti λ diapazone tarp 100 cm ir 0,33 mm. Tačiau diapazone $\lambda > 30$ cm šiek tiek prisimaišo ir labai tolimų galaktikų, ypač aktyviųjų, skleidžiamos radijo bangos. Įvertinant naujausius matavimus su oro balionais iškelta aparatūra, patikimiausia reliktinių fotonų temperatūros vertė pasirenkama 2,728 K. Šią temperatūros vertę įrašę į (**9.47**) ir (**9.48**) sąryšius, gauname: $N_0 = 4{,}117 \cdot 10^8\ \mathrm{m^{-3}}$, $u_0 = 4{,}190 \cdot 10^{-14}\ \mathrm{J \cdot m^{-3}} = 2{,}615 \cdot 10^5\ \mathrm{eV \cdot m^{-3}}$. (Indeksas „0“ reiškia, kad šių, taip pat visų kitų šiame poskyryje pateikiamų dydžių skaitinės vertės tinka dabartiniam laikui.) Pasitelkę Einšteino formulę $E = mc^2$, apskaičiuojame reliktinių fotonų masės tankį ρ_f:



9.9 pav. *Metagalaktikos fono spinduliuotės spektras. Tokį spektrą matytume, jei fotonų registravimo aparatūra būtų tarpgalaktinėje erdvėje toli nuo galaktikų. Tai viso dangaus švytėjimo fotonai. Juos sudaro reliktiniai fotonai ir perspektyviniame dangaus reginyje tiesiog susiliejančių labai tolimų, atskirai neužčiuopiamų galaktikų spinduliuotės fotonai.*
Ištisinės linijos – stebėjimų rezultatai. Brūkšninės linijos – teorinių įvertinimų rezultatai. Tolimųjų L_s kontinuumo UV spindulių indėlis lieka neįvertintas, nes tokie spinduliai mūsų nepasiekia – yra sugeriami tarpžvaigždinių H atomų. (Ši sritis paveiksle užbrūkšniuota.)

$$\rho_{f0} = \frac{u_0}{c^2} = 4{,}661 \cdot 10^{-31} \quad kg \cdot m^{-3}. \qquad (9.52)$$

Reliktinių fotonų energijos kreivės maksimumo bangų ilgį λ_{max} rasime pasinaudoję Vyno poslinkio dėsniu:

$$\lambda_{max0} = b/T_{f0} = 1{,}06 \text{ mm}. \qquad (9.53)$$

9.9.3. Reliktinių fotonų dalies kitimas Mūsų Visatos masės ir gravitacijos balanse

Jau kalbėjome, kad (mūsų manymu) patikimiausiomis yra laikomos šios Mūsų Visatos dabartinę būklę nusakančios vertės, nustatytos teorinius modelius, kur tik galima, lyginant su stebėjimų duomenimis: $\rho_{bar0} = 4 \cdot 10^{-28}$ kg·m^{-3}, $\rho_{v0} = 3 \cdot 10^{-27}$ kg·m^{-3} (vadinasi, $\rho_{m0} = 3{,}4 \cdot 10^{-27}$ kg·m^{-3}), $\rho_{\Lambda} = 6{,}6 \cdot 10^{-27}$ kg·m^{-3}, $T_{f0} = 2{,}728$ K. Iš šių duomenų gauname: $N_{f0} = 4{,}117 \cdot 10^{8}$ m^{-3}, $\rho_{f0} = 4{,}661 \cdot 10^{-31}$ kg·m^{-3}, $\lambda_{max0} = 1{,}06$ mm, $\rho_{bar0}/\rho_{f0} = 860$, $\rho_{v0}/\rho_{f0} = 6400$, $\rho_{m0}/\rho_{f0} = 7300$, $N_f/N_{bar} = 1{,}73 \cdot 10^{9\pm1}$.

Taigi dabar reliktinių fotonų sistemos temperatūra tokia žema, fotonai tokie ilgabangiai, tokių mažų energijų, kad jų masės tankis net 7300 kartų mažesnis už visos (ir matomosios, ir nematomosios) medžiagos dabartinį vidutinį tankį. Tačiau praeityje buvo kitaip. Juk Visata plečiasi. Nuotoliai tarp galaktikų sistemų ir kitų tolimų objektų didėja. O didėjimo greitis pats proporcingas nuotoliui tarp atitinkamų objektų R. Dėl to vienodu mastu mažėja ir fotonų, ir nukleonų skaičius m^{-3}, visą laiką likdamas $\sim(1/R^3)$. Jų skaičių santykis lieka tas pats: $N_f/N_{bar} = 1{,}73 \cdot 10^{9\pm1}$, kai masių santykis kinta. Mat nukleonai lieka tokie patys, o fotonai, negalėdami tapti nepusiausviraisiais ir todėl paklusdami pusiausvirosios spinduliuotės dėsniams, kinta: ilgėja jų bangos, mažėja kiekvieno fotono energija ir masė. Juk mažėjant pusiausvirųjų fotonų skaičiui vienetiniame tūryje, kartu mažėja ir jų sistemos temperatūra, didėja atstumai tarp fotonų, o vidutinis bangų ilgis visą laiką darosi maždaug lygus šiems atstumams. Todėl reliktiniams fotonams visą laiką galioja šie proporcingumai: $\lambda \sim R$, vieno fotono energija $\varepsilon \sim T \sim (1/R)$, fotonų skaičius vienetiniame tūryje $N_f \sim T^3 \sim (1/R)^3$, fotonų energijos ir masės tankis $u = \rho_f c^2 \sim T^4 \sim (1/R)^4$. Vadinasi, fotonų ir nukleonų masių tankių santykis $\rho_f/\rho_{bar} \sim T \sim (1/R)$. Taigi Visatai plečiantis, šis santykis nepaliaujamai mažėja. Kuo toliau į praeitį, tuo jis buvo didesnis.

Pavyzdžiui, tolimoje praeityje buvo laikas $t \approx 8000$ metų (nuo Visatos pradžios), kai visi nuotoliai, taigi ir reliktinių fotonų bangų ilgiai Mūsų Visatoje buvo 7300 kartų mažesni negu dabar. Šį įvykį ir jo laiką t gali apibūdinti

esamojo ir buvusiojo nuotolių santykis R_0/R = 7300 arba raudonojo poslinkio rodiklis (žr. (8.14) $z+1$ = 7300 (žr. 24 lentelę). Tuomet reliktinių fotonų temperatūra (tuo laiku fotonų temperatūra dar tebesutapo su medžiagos temperatūra) $T = 7300T_0 \approx 20\ 000$ K. Fotonų energijos kreivės maksimumas buvo ties 145 nm. Taigi reliktiniai fotonai tuomet buvo ultravioletinės, regimosios ir artimosios infraraudonosios, o ne radijo srities kaip dabar. Jų skaičiaus tankis buvo $N_f = 7300^3 N_{f0} \approx 1{,}6 \cdot 10^{20}\ m^{-3}$. O jų masės tankis buvo $\rho_f = 7300^4 \rho_{f0} \approx 1{,}3 \cdot 10^{-15}\ kg \cdot m^{-3}$. Medžiagos tankis tuomet irgi buvo $\rho_m = 7300^3 \rho_{m0} \approx 1{,}3 \cdot 10^{-15}\ kg \cdot m^{-3}$. Matome, kad tuomet baigėsi spindulių era ir prasidėjo medžiagos era.

Dar anksčiau Mūsų Visatos temperatūra buvo dar aukštesnė, fotonai buvo Rentgeno, dar anksčiau – gama srities.

Iš pirmo žvilgsnio gali pasirodyti, jog mažėjant kiekvieno fotono energijai, negalioja energijos tvermės dėsnis. Tačiau taip nėra. Juk mes registruojame tuos reliktinius fotonus, kurie atskrieja iš labai tolimų Metagalaktikos sričių, tiek tolimų, kad pakeliui užtruko beveik visą Mūsų Visatos egzistavimo laiką – apie 14 milijardų metų. Šios tolimos sritys beveik šviesos greičiu tolsta nuo mūsų. Mes reliktinius fotonus registruojame pailgėjusius kaip tiktai tiek, kiek reikalauja Doplerio reiškinys. Galima sakyti, kad reliktinių fotonų energija niekur nedingsta, ji lyg „įstringa“ besiplečiančioje erdvėje, tarytum erdvei „paskolinama“. Jei kada nors Mūsų Visata nustotų plėstis ir pradėtų greitėdama trauktis, reliktinių fotonų bangų ilgiai liautųsi didėję ir imtų sparčiai trumpėti, fotonų energija imtų katastrofiškai didėti – erdvė grąžintų fotonams skolą. Tokia pat situacija būtų ir su tolimomis galaktikomis.

Raudonojo poslinkio rodiklis $z+1 = R_0/R = T/T_0 = T/2{,}728$ dažnai naudojamas apibūdinti ir laikui t, kada visi atstumai Visatoje buvo $z+1$ kartų mažesni negu dabar, ir nuotoliui, iš kurio tik dabar mus pasiekia laiku t išspinduliuotos elektromagnetinės bangos, ir Doplerio reiškinio mastui, taigi greičiui, kuriuo anuomet nuo mūsų tolo tie objektai, kurių signalai tik dabar mus pasiekia.

9.9.4. Reliktinių fotonų atsiskyrimas nuo medžiagos

Per visą spindulių erą kosmologinės plazmos laisvieji elektronai vis mėgindavo rekombinuoti – pradėti skrieti apie protonus ir deuterio bei helio branduolius ir taip sukurti neutralius vandenilio ir helio atomus. Tačiau vis dar galingi ir milijardą kartų gausesni fotonai juos tuoj pat vėl jonizuodavo, patys dėl to žūdami – tapdami sugertais. O nauji rekombinacijos aktai juos vėl atkurdavo. Tai – surištieji laisvieji šuoliai atomuose. Fotonus sklaidė bei jų energiją keitė ir laisvieji elektronai. Vyko ir laisvieji šuoliai, kurie fotonus ir sugerdavo ir vėl gamindavo naujus. Taip šiluminės pusiausvyros sąlygomis buvo palaikoma sąveika tarp fotonų ir medžiagos dalelių. Dėl to neskaidri kosmo-

loginė plazma tuomet irgi buvo šiluminėje pusiausvyroje su fotonais, jos temperatūra visą laiką buvo tokia pat kaip ir fotonų visumos temperatūra. Visatai plečiantis, ji mažėjo, likdama ~(1/*R*).

Taip tęsėsi ir medžiagos eros pradžioje. Tačiau praėjus maždaug 350 000 ar 400 000 metų ir temperatūrai sumažėjus iki 3000 K, dauguma fotonų atsidūrė geltonojoje, raudonojoje ir net infraraudonojoje spektro srityse. Tolimosios ultravioletinės srities fotonų liko visiškai mažytis procentas. Tuo tarpu vandenilį iš pirmojo energijos lygmens jonizuoti pajėgia tik Laimano kontinuumo fotonai, kurių $\lambda < 91{,}2$ nm. Heliui iš pirmojo lygmens jonizuoti reikia dar galingesnių fotonų, kurių $\lambda < 50{,}4$ nm. O į aukštesnius energijos lygmenis atomai beveik nebepakildavo (dėl labai sumažėjusio kosmologinio debesies tankio ir pažemėjusios temperatūros). Todėl jonizacijos aktai ėmė darytis retesni negu rekombinacijos aktai. Kosmologinė plazma palaipsniui pavirto nejonizuotų vandenilio ir helio atomų mišinio debesiu, skaidriu beveik visiems pralekiantiems fotonams.

Sakoma, kad tada fotonai atsiskyrė nuo medžiagos, tapo tikrai reliktiniai. Daugiau jie nebebuvo sugeriami ir vėl atkuriami. Jie laisvai šviesos greičiu tebelekia visomis kryptimis per Mūsų Visatos platybes. Šiandien į mūsų radijo teleskopus patenka tie reliktiniai fotonai, kurie pakeliui sugaišo visą nuo kosmologinės plazmos masinės rekombinacijos iki mūsų dienų praslinkusį laiką. Vadinasi, jie iš visų pusių atlekia iš vienodo maždaug $(13–15)\cdot 10^9$ šviesmečių nuotolio, tai yra iš tų kosmologinio debesies vietų, kurias mes „užklumpame“ perėjimo iš plazminės į neutralių dujų būklę metu.

Dar iš toliau elektromagnetinės bangos nesklinda, nes tolimesnius pirminio kosmologinio debesies sluoksnius mes matytume dar jaunesnio negu 350 tūkstančių metų amžiaus. O tuomet kosmologinis debesis dar tebebuvo jonizuotas, taigi neskaidrus.

Taigi reliktiniai fotonai atlekia iš palyginti nestoro pusiau jonizuotų dujų klodo, kuris yra sferinės formos ir mus gaubia iš visų pusių. Susidaro įspūdis, lyg šis klodas būtų kitų, dar toliau (gilesnėje praeityje) esančių neskaidrių plazmos klodų šviečiantis paviršius, savotiškai panašus į žvaigždės fotosferą. Jis ir vadinamas ***kosmologine fotosfera***. Tik ši fotosfera yra išvirkščia – ji mus gaubia iš visų pusių, mes esame jos viduje. Šiapus fotosferos matome galaktikas. Fotosfera yra apgaubusi baigtinį jų skaičių. Toliau (senesnėje praeityje) už galaktikų, arčiau fotosferos turėtų būti sritys, kuriose galaktikos dar tik formuojasi. Tačiau mūsų stebėjimų galimybės kol kas per menkos šį procesą aptikti. O iš anapus fotosferos, t. y. iš arčiau kosmologinio horizonto esančių Visatos tūrių elektromagnetinės bangos mūsų nepasiekia.

Užtat iš ten mus pasiekia reliktiniai neutrinai. Kai sugebėsime juos registruoti, gausime informaciją iš tokių kosmologinės plazmos sričių, kurioms tik 60 000–90 000 km betrūksta iki paties kosmologinio horizonto. Juk elektroniniams neutrinams kosmologinė plazma praskaidrėjo praėjus vos 0,2–0,3 s nuo

Visatos plėtimosi pradžios. O jei pajėgtume registruoti reliktinius tauoninius neutrinus, iki horizonto „prasibrautume“ dar arčiau – beliktų tik 3000 km. Tiesa, atrodo, kad neutrinai turi rimties masę, taigi skrenda ne šviesos greičiu, o vos vos mažesniu informaciją atnešdami iš truputėlį artimesnių sričių.

Po kosmologinės plazmos rekombinacijos fotonų visumos temperatūra ir toliau žemėjo, likdama $\sim(1/R)$. Ji ir dabar tebežemėja, nors ir nukritusi iki 2,728 K. Tiesa, masinės rekombinacijos metu gimė daug naujų fotonų. Jie laikinai šiek tiek pakėlė fotonų visumos temperatūrą ir truputį iškreipė jų energijos kreivę, sustiprindami jos trumpabangio sparno tolimąją dalį.

Nuo fotonų atsiskyrusios medžiagos temperatūra irgi žemėjo. Per maždaug 20–60 milijonų metų ji nukrito iki 200–100 K. Kartu labai sustiprėjo jau anksčiau buvusios visiškai mažos tankio ir temperatūros fliuktuacijos, apie kurių buvimą ne tik teoriškai samprotaujama, bet ir liudija visiškai mažyčiai reliktinių fotonų temperatūros ir poliarizacijos nelygumai skirtingose dangaus vietose, aptikti iškėlus reliktinių fotonų registravimo aparatūrą virš atmosferos. Dėl šių priežasčių atskiros kosmologinio debesies sritys nebepajėgė įveikti gravitacijos jėgos, jų plėtimosi greitis pradėjo vis labiau atsilikti nuo visos Mūsų Visatos plėtimosi greičio. Galiausiai jos ėmė trauktis ir suskilo į progalaktinius debesis bei įvairaus rango jų grupes. Atsirado žvaigždės ir juodosios bedugnės.

Taip medžiagoje atsirado dideli išsilaisvinančios gravitacinės ir termobranduolinės energijos kiekiai. Medžiagos temperatūra dėl to pakilo, tapo skirtinga nei reliktinių fotonų temperatūra.

9.9.5. Saulės judėjimas reliktinių fotonų sistemos atžvilgiu

Reliktiniai fotonai iš principo leidžia sukurti privilegijuotą atskaitos sistemą ir nustatyti Žemės judėjimą šios atskaitos sistemos atžvilgiu. Įsivaizduokime, kad įvairiose Metagalaktikos vietose yra stebėtojų. Tegu vienas kito atžvilgiu jie juda tik tiek, kiek reikalauja Hablo dėsnis, vadinasi, nuotoliai tarp kiekvieno jų didėja greičiu, kuris pats proporcingas nuotoliui. Tarkime, jokio kitokio jų judėjimo nėra. Tuomet galima sakyti, kad reliktinių fotonų visumos atžvilgiu jie nejuda. Į kiekvieną iš šių stebėtojų reliktiniai fotonai atskrieja visiškai vienodai. Toks stebėtojas visomis kryptimis išmatuos visiškai vienodą reliktinių fotonų srautą ir jų temperatūrą. Kitaip sakant, reliktinių fotonų spinduliuotė tokiam stebėtojui bus izotropiška (išskyrus minėtas visiškai mažytes fliuktuacijas).

O dabar įsivaizduokime dar vieną stebėtoją, kuris, judėdamas dėl bendro Metagalaktikos plėtimosi, dar ir pats juda kitų stebėtojų atžvilgiu. Iš tos krypties, į kurią papildomai judės, dėl Doplerio reiškinio jis priims patrumpėjusių bangų, taigi padidėjusios energijos fotonus. Iš tos krypties bus užregist-

ruotas stipresnis fotonų srautas, bus nustatyta aukštesnė jų temperatūra. O iš priešingos krypties sklis sumažėjusios temperatūros fotonų srautas.

Tai patvirtina stebėjimų rezultatai. Nuo Liūto ir Taurės žvaigždynų ribos (α = 11^h15^m, δ = –5,°6 arba l = 265°, b = 50°) atskriejančių reliktinių fotonų temperatūra 0,26% arba 0,007 K aukštesnė negu iš priešingos dangaus pusės – nuo Žuvų žvaigždyno netoli Vandenio ir Pegaso ribos. Tai rodo, kad Saulė kartu su Žeme reliktinių fotonų visumos atžvilgiu lekia 370 km/s greičiu Liūto ir Taurės kryptimi. Užčiuopiami ir mažyčiai sezoninai pokyčiai dėl Žemės skriejimo apie Saulę 30 km/s greičiu. Žinome, kad Saulė skrieja apie Galaktikos centrą beveik 220 km/s greičiu. Galaktikos centras 120 km/s greičiu juda Andromedos galaktikos link. Į visa tai atsižvelgus, aiškėja, kad Vietinės galaktikų grupės centras reliktinių fotonų visumos atžvilgiu lekia 600 km/s greičiu Hidros, Sekstanto ir Taurės žvaigždynų ribos kryptimi (l = 275°, b = 30°). Šio judėjimo kryptis su kryptimi į Mergelės spiečių sudaro 50° kampą. Į Mergelės spiečių nukreiptojo greičio komponento dydis 400 km/s. O iš galaktikų spindulinių greičių skirtumų nustatoma, kad Vietinė grupė prie Mergelės spiečiaus artėja tik 250 km/s greičiu. Vadinasi, mes judame ne tik Lokalinio superspiečiaus viduje. Dar greičiau lekiame kartu su visu savuoju superspiečiumi, kurį pritraukia kiti superspiečiai. Tačiau iš pradžių atrodė, kad tokiam pritraukimui tarytum neužtenka visų žinomų superspiečių traukos. Susiformavo hipotezė, jog pasislėpęs už Paukščių Tako dulkelių kažkur tarp Kentauro ir Povo žvaigždynų maždaug $(60–70)\cdot10^6$ pc nuotolyje turėtų būti dar vienas labai masyvus superspiečius, jau pavadintas ***Didžiuoju Atraktoriumi***. (angl. *attract* – pritraukti). Maždaug ta kryptimi Kampainio žvaigždyne $80\cdot10^6$ pc nuotolyje aptiktas negausus kelių dešimčių galaktikų spiečius ACO 3627 atrodė per menkas. Vis dėlto keleto paskutiniųjų metų stebėjimai, panaudojus pačius tobuliausius regimosios šviesos ir IR spindulių imtuvus, leido mūsų žvilgsniui prasiskverbti pro Paukščių Tako šydą. Paaiškėjo, kad Paukščių Tako užstotas spiečius ACO 3627 tikrovėje yra labai turtingas ir masyvus. Jame priskaičiuota tūkstančiai galaktikų, kurių radialiniai greičiai rodo, kad šio spiečiaus masė net 50 000 kartų didesnė nei mūsų Galaktikos masė. Taigi hipotetinis Didysis Atraktorius pagaliau surastas (žr. **9.10** pav.).

9.9.6. Reliktinių fotonų fliuktuacijos

Infliacijos erą aprašantys Visatos modeliai teigia, kad šioje eroje, išsiskiriant erdvei ir laikui, kuriantis fizikiniams laukams ir elementariosioms dalelėms, turėjo susidaryti mažyčiai tankio ir temperatūros nelygumai – fliuktuacijos. To reikalauja kvantinė fizika, pavyzdžiui, kvantinė erdvės ir laiko prigimtis, Heizenbergo neapibrėžtumo principas. Skirtingose vietose turėjo truputį skirtis fizikinio vakuumo energijos išsekimo, tuo pačiu ir infliacijos



9.10 pav. *Milžiniško galaktikų spiečiaus ACO 3627 centrinė dalis, prasišviečianti pro 0°,4 x 0°,5 dydžio Paukščių Tako lopinėlį Kampainio žvaigždyne. Matosi gausybė tolimų Paukščių Tako žvaigždučių. Aplink didesnio spindesio žvaigždes išryškėja teleskope susidarantys difrakciniai žiedai ir kryžiai. Visos miglotos dėmelės be difrakcinių kryžių yra galaktikos. Visame spiečiuje jų yra tūkstančiai. Labai panašu, kad šis 80·10^6 pc nuotolyje rastas spiečius, 50 000 kartų masyvesnis už mūsų Galaktiką, kaip tik ir yra ilgai ieškotasis Didysis Atraktorius. Elektroninė nuotrauka, panaudojus ir regimosios šviesos, ir artimuosius IR spindulius, gauta 2,2 m skersmens La Silos (Čilė) observatorijos teleskopu*

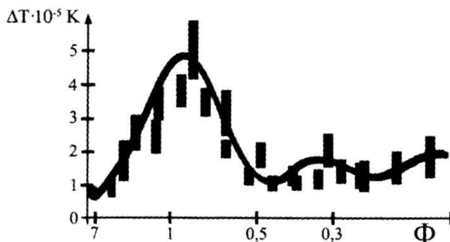
eros pabaigos laikas ir aplinkybės. Visa tai atsiradusioje kosmologinėje plazmoje turėjo sukelti akustines bangas. O pastarosios – sukurti didesnio ir mažesnio tankio sričių mozaiką. Šios mozaikos elementai plėtėsi kartu su visa Mūsų Visata. Kol kosmologinis dujų debesis tebebuvo jonizuotas ir neskaidrus, beveik du milijardus kartų gausesni fotonai stengėsi išlyginti medžiagos tankio nelygumus, neleido išaugti tankio kontrastams.

Kaip prisimename (žr. **9.9.4**), taip tęsėsi 350 000–400 000 metų. Vėliau, kosmologinei plazmai rekombinuojant, fotonai atsiskyrė nuo medžiagos, daugiau nebetrukdė gravitacijos jėgai labai padidinti tankio kontrastus. O ilgainiui išaugę medžiagos tankio kontrastai pagaliau davė pradžią atsirasti žvaigždėms ir galaktikoms.

Fotonams atsiskiriant nuo medžiagos, jų temperatūra irgi turėjo įgauti tokį pat mozaikinį pasiskirstymą kaip ir medžiagos tankis. Juk išlėkdami iš didesnio medžiagos tankio sričių, fotonai turi nugalėti didesnę traukos jėgą,

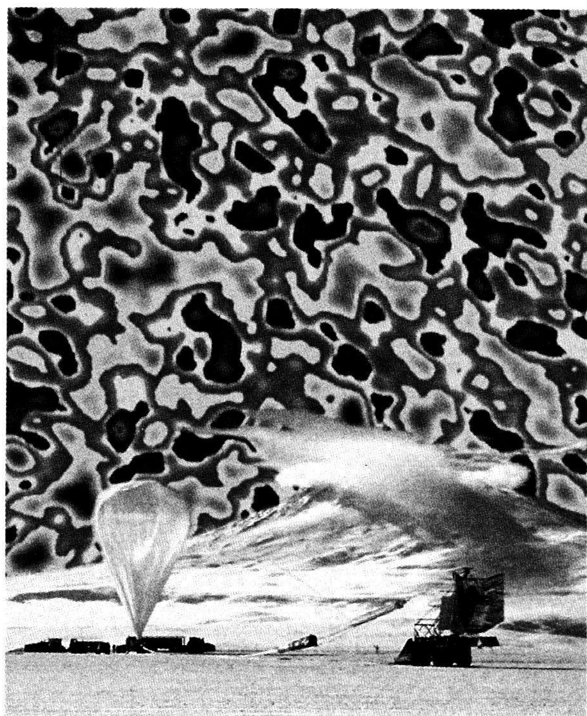
atlikti didesnį darbą, taigi netekti daugiau energijos. Tokių fotonų temperatūra turi pasidaryti truputį žemesnė negu fotonų, išlekiančių iš mažesnio medžiagos tankio sričių.

Todėl be jau minėto reliktinių fotonų temperatūros skirtumo, atsirandančio dėl Žemės judėjimo, pasak modelių, dar turėtume pastebėti, kad reliktinių fotonų pagalba gautas dangaus skliauto, tai yra kosmologinės fotosferos vaizdas esąs išmargintas sunkiai užčiuopiamo temperatūrų skirtumo dėmėmis. Tokų fliuktuacinių dėmių buvimą 1970 m. numatė Edvardas Harisonas (*E. Harrison,* JAV). O 1972 m. apie tai išsamiau prabilo Jakovas Zeldovičius (Sovietų Sąjunga). Turėtų vyrauti maždaug 1° skersmens vos vos „šiltesnės“ ir „šaltesnės“ dėmės. Tokie numatomų dėmių matmenys buvo gauti, darant prielaidą, kad infliacijos eros pabaigoje užsimezgusias skirtingo tankio ir temperatūros fliuktuacijas Mūsų Visatos plėtimasis per (3–4)·10^5 metų, tai yra iki masinės rekombinacijos epochos ištempė iki (3–4)·10^5 šviesmečių skersmens. Vėlesnis Mūsų Visatos plėtimasis visus nuotolius dar padidino $z+1 \approx 1000$ kartų. Jei Mūsų Visata yra plokščia (euklidinė) ir lygiagretės tiesės visuose nuotoliuose išlieka lygiagretės, o tam tikru kampu prasiskleidžiantys spinduliai visą laiką išlaiko tą patį prasiskleidimo kampą, tai iš (13–15)·10^9 šviesmečių nuotolio šitokias fliuktuacijas mes kaip tiktai ir turime matyti maždaug 1°–1°,5 kampu. Jei Mūsų Visata būtų ne plokščia, o sferinė, reliktinių fotonų temperatūrinės fluktuacijos turėtų matytis didesniu kampu, o jei hiperboloidinė – mažesniu. Tačiau infliacijos hipotezė reikalauja, kad Mūsų Visata būtų euklidinė. Reliktinių fotonų fliuktuacijoms, jų pobūdžiui, jų pasiskirstymui prigijo ***Harisono ir Zeldovičiaus spektro*** vardas.



9.11 pav. *Kosmologinės fotosferos fliuktuacinių dėmių (žr.* **9.12** pav.*) kampiniai matmenys ir jų sąryšis su dėmių temperatūros skirtumais ΔT. Φ – dėmių kampiniai skersmenys laipsniais. Ištisinė kreivė – rezultatai teorinio modelio, pripažįstančio infliacijos erą ir Mūsų Visatos plokščią, t. y. euklidinę geometriją. Vertikalūs stulpeliai – „COBE“, „BOOMERANG“ ir „MAXIMA“ matavimų rezultatai su savo paklaidomis. Matome, jog šie reliktinių fotonų anizotropijos matavimai leidžia tikėtis, kad Mūsų Visata yra euklidinė* ($\Omega = 1$) *ir kad jos istorijoje buvo infliacijos laikotarpis*

Matome, kad teoriniai modeliai iš anksto nurodė, jog reikia ieškoti reliktinių fotonų temperatūrinių fliuktuacijų. Jos ir buvo sėkmingai surastos. Tai 1989–2000 m. atliko erdvėlaivis COBE, į viršutinius atmosferos sluoksnius iškilę helio dujų pripildyti balionai BOOMERANG ir MAXIMA, taip pat Antarktidoje įrengtas radijo interferometras DASI. Nustatyta vidutinė reliktinių fotonų temperatūra $T_{f0} = 2{,}728$ K. Skirtingos temperatūros netaisyklingos formos dėmių skersmenys dažniausiai apie 1°. Temperatūros skirtumas apie



9.12 pav. *Reliktinių fotonų sukurtas dalies dangaus skliauto vaizdas, gautas 1998 m. virš Antarktidos 37 km aukštyje baliono skraidintu radijo teleskopu. Priekyje pavaizduotas ir pats balionas BOOMERANG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geomagnetics).*

0,00007 K. Rastos ir vos 0,00005 K besiskiriančios 0°,35 ir 0°,2 skersmenų dėmės. Jos irgi buvo teorinių modelių numatytos.

Tuo būdu reliktinių fotonų fliuktuacijos tarytum jau patvirtina Mūsų Visatos euklidiškumą ir infliacijos hipotezės tikrumą. Tačiau taip išsamiai ištirti vos keli procentai dangaus skliauto. Daug tikimasi iš kosminės observatorijos MAP, 2001 m. pradėjusios iš Lagranžo taško L 2 sudarinėti visos kosmologinės fotosferos temperatūrinį planą 0,00002 K tikslumu. 2007 m. reliktinius fotonus turėtų pradėti tirti dar 10 kartų jautresnė jau iš anksto M. Planko vardu pavadinta kosminė observatorija.

Reliktinių fotonų poliarizacijos tyrimai irgi leidžia gauti papildomos informacijos apie buvusias kosmologinės plazmos fliuktuacijas, lėmusias dabartinę Mūsų Visatos strutūrą.

Reliktiniai fotonai jau leidžia pamatyti vos 35 0000 m. amžiaus Mūsų Visatą. Kur kas jaunesnę ją pamatysime, kai sugebėsime registruoti reliktinius neutrinus. Tačiau tai daug tolimesnės ateities uždavinys.

9.10. ANTROPINIS PRINCIPAS

Per pastaruosius keturiasdešimt metų daugelis mokslininkų vis labiau ėmė kreipti dėmesį į tai, kad Mūsų Visatoje kai kurios pagrindinės fizikinės konstantos, kai kurie duomenys ir dėsningumai lyg tyčia yra kaip tik tokie, kurie sudaro gyvybei tinkamas sąlygas. Jeigu bent vienas iš jų būtų susiklostęs kitoks, tai Mūsų Visata būtų buvusi daug skurdesnė, neturinti sąlygų gyvybei. Tai vadinamasis ***antropinis principas*** (gr. *anthropos* – žmogus). Pateiksime keletą pavyzdžių.

1. Elektronas savo nepaprastai maža mase labai skiriasi nuo miuonų, tauonų, mezonų, nukleonų, hiperonų. Jis net 1836 kartus lengvesnis už protoną. Tačiau jei jo masė būtų vos tris kartus didesnė už esamą, tai negalėtų egzistuoti vandenilio atomai, nes elektronai jungtųsi su protonais, sudarydami neutronus ir neutrinus. Mūsų Visata būtų be gyvybės, sudaryta vien tik iš neutroninių žvaigždžių.

2. Neutronas tik 0,14% masyvesnis už protoną. Jei šis masių skirtumas būtų vos dvigubai didesnis, deuterio branduolys būtų nestabilus. Tokioje visatoje negalėtų susidaryti nei helis, nei už jį sunkesni elementai. Nebūtų cheminių elementų įvairovės, nebūtų ir gyvybės.

3. Vadinamoji stiprioji sąveika garantuoja ryšį tarp nukleonų atomų branduoliuose. Jei ji bent 10% sustiprėtų, būtų stabilus branduolys, sudarytas vien tik iš dviejų protonų. Pavadinkime jį biprotonu arba superlengvojo helio branduoliu. Tokioje visatoje visi protonai susijungtų į biprotonus. Nebeliktų vandenilio. Taip pat nesusidarytų už helį sunkesnių elementų.

Gyvybei pražūtingas ir lygiai toks pat nedidelis nukrypimas į priešingą pusę – jei stiprioji sąveika būtų 10 procentų silpnesnė, deuterio branduoliai būtų nestabilūs.

4. Realus vidutinis Visatos tankis labai artimas kritiniam tankiui. O kodėl jis negalėtų būti, pavyzdžiui, milijoną kartų didesnis arba mažesnis už kritinį? Pirmuoju atveju jau seniai tokia visata būtų nustojusi plėstis ir pradėjusi trauktis. Gyvybės raidai neužtektų laiko. Antruoju atveju plėtimasis būtų per greitas, nebesusidarytų žvaigždės.

5. Gravitacijos jėga yra daug silpnesnė už elektrines ir branduolines jėgas. Tačiau jei ji nebūtų tokia silpna, žvaigždės gyvuotų per trumpai.

6. Paulio draudimo principas priverčia elektronus atomuose pasiskirstyti po įvairius elektroninio apvalkalo sluoksnius ir pasluoksnius. Jei šis principas neveiktų, chemija labai nuskurstų, gyvybė negalėtų atsirasti.

7. Jei erdvės matmenų skaičius (neįskaitant kompaktifikuotųjų) būtų didesnis už tris, negalėtų egzistuoti sistemos, atitinkančios mūsų atomus ir planetų sistemas. O gyvybės dvimatėje ar vienmatėje erdvėje irgi neįsivaizduojame.

Taigi Mūsų Visata yra tokia graži ir sudėtinga tik dėl stebėtinai susiklosčiusių aplinkybių jai infliacijos eroje kuriantis iš fizikinio vakuumo. Šios palankios aplinkybės toli gražu nėra būtinos. Kur kas labiau tikėtinos nepalankios gyvybei aplinkybės. Turime eiti prie išvados, kad Mūsų Visata tėra viena iš didžiulės

gausybės kitų visatų, kurių absoliuti dauguma lieka niekieno nepamatytos ir netyrinėtos, nes jose nėra gyvybės. Daugelis jų neprilygsta mūsiškei cheminių elementų ir junginių įvairove. Kai kuriose gali visiškai nebūti žvaigždžių, planetų ar net atomų. Mūsų Visata – tai labai retai pasitaikanti fliuktuacija tarp daugybės kitų visatų. Iš kitų, daug kuklesnių visatų ją išskyrė nuostabus labai retų atsitiktinumų sutapimas.

Jei Mūsų Visata daug kartų kartoja plėtimosi ir traukimosi ciklus, reikia manyti, kad kiekvieną ciklą ji pradeda susikurdama vis kitokias daleles ir sąveikas tarp jų, įgydama vis kitas kai kurių duomenų vertes, gal net kitą erdvės matmenų skaičių. Toks palankus gyvybei ciklas, kaip mūsiškis, matyt, pasitaiko labai retai.

O gal antropinio principo paaiškinimui visiškai nebūtina pasitelkti fliuktuacijas, labai retų atsitiktinumų sutapimą? Gal tiesiog tokia Kūrėjo valia?

1 lentelė. ŽVAIGŽDYNAI

Lotyniškas pavadinimas	Kilmininkas	Santrumpa	Lietuviškas pavadinimas	Vidurio apytiks. koord.	
				α^h	δ°
Andromeda	Andromedae	And	Andromeda	1	+40
Antlia	Antliae	Ant	Siurblys	10	−35
Apus	Apodis	Aps	Rojaus Paukštis	16	−75
Aquarius	Aquarii	Aqr	Vandenis	23	−15
Aquila	Aquilae	Aql	Erelis	20	+5
Ara	Arae	Ara	Aukuras	17	−55
Aries	Arietis	Ari	Avinas	3	+20
Auriga	Aurigae	Aur	Vežėjas	6	+40
Bootes	Bootis	Boo	Jaučiaganis	15	+30
Caelum	Caeli	Cae	Skaptukas	5	−40
Camelopardalis	Camelopardalis	Cam	Žirafa	6	+70
Cancer	Cancri	Cnc	Vėžys	9	+20
Canes Venatici	Canum Venaticorum	CVn	Skalikai	13	+40
Canis Major	Canis Majoris	CMa	Didysis Šuo	7	−20
Canis Minor	Canis Minoris	CMi	Mažasis Šuo	8	+5
Capricornus	Capricorni	Cap	Ožiaragis	21	−20
Carina	Carinae	Car	Laivo Kilis	9	−60
Cassiopeia	Cassiopeiae	Cas	Kasiopėja	1	+60
Centaurus	Centauri	Cen	Kentauras	13	−50
Cepheus	Cephei	Cep	Cefėjas	22	+70
Cetus	Ceti	Cet	Banginis	2	−10
Chamaeleon	Chamaeleontis	Cha	Chameleonas	11	−80
Circinus	Circini	Cir	Skriestuvas	15	−60
Columba	Columbae	Col	Balandis	6	−35
Coma Berenices	Comae Berenices	Com	Berenikės Garbanos	13	+20
Corona Australis	Coronae Australis	CrA	Pietų Vainikas	19	−40
Corona Borealis	Coronae Borealis	CrB	Šiaurės Vainikas	16	+30
Corvus	Corvi	Crv	Varnas	12	−20
Crater	Crateris	Crt	Taurė	11	−15
Crux	Crucis	Cru	Kryžius	12	−60
Cygnus	Cygni	Cyg	Gulbė	21	+40
Delphinus	Delphini	Del	Delfinas	21	+10
Dorado	Doradus	Dor	Aukso Žuvis	5	−65
Draco	Draconis	Dra	Slibinas	17	+65
Equuleus	Equulei	Equ	Žirgelis	21	+5
Eridanus	Eridani	Eri	Eridanas	3	−20
Fornax	Fornacis	For	Krosnis	3	−30
Gemini	Geminorum	Gem	Dvyniai	7	+20
Grus	Gruis	Gru	Gervė	22	−45
Hercules	Herculis	Her	Heraklis	17	+30
Horologium	Horologii	Hor	Laikrodis	3	−60
Hydra	Hydrae	Hya	Hidra	10	−20
Hydrus	Hydri	Hyi	Pietų Hidra	2	−75
Indus	Indi	Ind	Indėnas	21	−55
Lacerta	Lacertae	Lac	Driežas	22	+45
Leo	Leonis	Leo	Liūtas	11	+15
Leo Minor	Leonis Minoris	LMi	Mažasis Liūtas	10	+35
Lepus	Leporis	Lep	Kiškis	6	−20
Libra	Librae	Lib	Svarstyklės	15	−15
Lupus	Lupi	Lup	Vilkas	15	−45
Lynx	Lyncis	Lyn	Lūšis	8	+45
Lyra	Lyrae	Lyr	Lyra	19	+40
Mensa	Mensae	Men	Stalkalnis	5	−80
Microscopium	Microscopii	Mic	Mikroskopas	21	−35
Monoceros	Monocerotis	Mon	Vienaragis	7	−5
Musca	Muscae	Mus	Musė	12	−70
Norma	Normae	Nor	Kampainis	16	−50
Octans	Octantis	Oct	Oktantas	22	−85
Ophiuchus	Ophiuchi	Oph	Gyvatnešis	17	0
Orion	Orionis	Ori	Orionas	5	+5
Pavo	Pavonis	Pav	Povas	20	−65
Pegasus	Pegasi	Peg	Pegasas	22	+20

Lotyniškas pavadinimas	Kilmininkas	Santrumpa	Lietuviškas pavadinimas	Vidurio apytiks. koord.	
				α^h	δ°
Perseus	Persei	Per	Persėjas	3	+45
Phoenix	Phoenicis	Phe	Feniksas	1	–50
Pictor	Pictoris	Pic	Tapytojas	6	–55
Pisces	Piscium	Psc	Žuvys	1	+15
Piscis Austrinus	Piscis Austrini	PsA	Pietų Žuvis	22	–30
Puppis	Puppis	Pup	Laivagalis	8	–40
Pyxis	Pyxidis	Pyx	Kompasas	9	–30
Reticulum	Reticuli	Ret	Tinklelis	4	–60
Sagitta	Sagittae	Sge	Strėlė	20	+10
Sagittarius	Sagittarii	Sgr	Šaulys	19	–25
Scorpius	Scorpii	Sco	Skorpionas	17	–40
Sculptor	Sculptoris	Scl	Skulptorius	0	–30
Scutum	Scuti	Sct	Skydas	19	–10
Serpens	Serpentis	Ser	Gyvatė	17	0
Sextans	Sextantis	Sex	Sekstantas	10	0
Taurus	Tauri	Tau	Tauras	4	+15
Telescopium	Telescopii	Tel	Teleskopas	19	–50
Triangulum	Trianguli	Tri	Trikampis	2	+30
Triangulum Australe	Trianguli Australis	TrA	Pietų Trikampis	16	–65
Tucana	Tucanae	Tuc	Tukana	0	–65
Ursa Major	Ursae Majoris	UMa	Didžioji Lokė Didieji Grįžulo Ratai	11	+50
Ursa Minor	Ursae Minoris	UMi	Mažoji Lokė Mažieji Grįžulo Ratai	15	+70
Vela	Velorum	Vel	Burės	9	–50
Virgo	Virginis	Vir	Mergelė	13	0
Volans	Volantis	Vol	Skraidančioji Žuvis	8	–70
Vulpecula	Vulpeculae	Vul	Laputė	20	+25

2 lentelė. KAI KURIE DUOMENYS APIE PLANETŲ ORBITAS

Planeta	a		P	
	av	10^6 km	atogr. metai	paros
Merkurijus	0,387	57,91	0,241	87,97
Venera	0,723	108,20	0,615	224,70
Žemė	1,000	149,60	1,000	365,26
Marsas	1,524	227,94	1,881	686,98
Jupiteris	5,203	778,33	11,862	4332,71
Saturnas	9,555	1429,40	29,457	10759,50
Uranas	19,191	2870,99	84,009	30685,00
Neptūnas	30,109	4504,30	164,788	60190,00
Plutonas	39,529	5913,52	248,050	90800,00

Planeta	S paros	e	i	V_0 km·s^{-1}
Merkurijus	115,9	0,206	7°,00	47,87
Venera	583,9	0,007	3,39	35,02
Žemė	–	0,017	0,00	29,79
Marsas	779,9	0,093	1,85	24,13
Jupiteris	398,9	0,049	1,31	13,07
Saturnas	378,1	0,056	2,49	9,67
Uranas	369,7	0,046	0,77	6,81
Neptūnas	367,5	0,010	1,77	5,44
Plutonas	366,7	0,246	17,15	4,74

Žymėjimai: a – orbitos didysis pusašis; av – astronominis vienetas (žr. **2.7**); P – siderinis apskriejimo periodas; S – sinodinis apskriejimo periodas; e – orbitos ekscentricitetas; i – orbitos plokštumos posvyris; V_0 – vidutinis orbitinis greitis.

3 lentelė. PLANETŲ FIZINIAI DUOMENYS

Planeta	R				ρ
	km	$R_{Ž}=1$	d	$M(M_{Ž}=1)$	$kg \cdot m^{-3}$
Merkurijus	2440	0,38	0,000	0,055	5430
Venera	6052	0,95	0,000	0,815	5250
Žemė	6378	1,00	0,003	1,000	5515
Marsas	3397	0,53	0,006	0,107	3930
Jupiteris	71492	11,21	0,065	317,892	1330
Saturnas	60268	9,45	0,098	95,184	690
Uranas	25559	4,01	0,023	14,536	1270
Neptūnas	24766	3,88	0,017	17,148	1640
Plutonas	1137	0,18	-	0,002	2060

Planeta	$g(g_{ž}=1)$	A_s	T	ε
Merkurijus	0,38	0,07	$58{,}65^d$	0°01′
Venera	0,91	0,76	$243{,}02^d$	177°22′
Žemė	1,00	0,36	$23{,}93^h$	23°26′
Marsas	0,38	0,20	$24{,}62^h$	25°12′
Jupiteris	2,36	0,50	$9{,}92^h$	3°07′
Saturnas	0,92	0,50	$10{,}23^h$	26°44′
Uranas	0,90	0,66	$17{,}23^h$	97°52′
Neptūnas	1,12	0,62	$16{,}10^h$	28°19′
Plutonas	0,06	0,50	$6{,}39^d$	122°31′

Žymėjimai: R – pusiaujo spindulys; d – paplokštumas (žr. **2.8**); M – masė Žemės ($5{,}974 \cdot 10^{24}$ kg) masėmis; ρ – vidutinis tankis; g – laisvojo kritimo pagreitis ties pusiauju; A_s – integralinis sferinis albedas; T – sukimosi apie ašį periodas; ε – pusiaujo posvyris į orbitos plokštumą.

4 lentelė. DIDESNIEJI PLANETŲ PALYDOVAI

Planeta	Palydovas	Orbitos spindulys 10^3 km	Apskriejimo periodas paromis	Skersmuo km	Tankis $kg \cdot m^{-3}$
Žemė	Mėnulis	384,40	27,322	3476	3340
Marsas	Fobas	9,38	0,319	27x21x19	1900
	Deimas	23,46	1,262	15x12x11	1800
Jupiteris	Amaltėja	181,3	0,498	262x146x134	1800
	Tebė	221,9	0,675	?x110x90	1500
	Ija	421,6	1,769	3642	3570
	Europa	670,9	3,551	3138	3010
	Ganimedas	1070	7,155	5268	1940
	Kalista	1883	16,689	4806	1850
	Himalija	11480	250,57	180	2800
Saturnas	Prometėjas	139,35	0,613	148x100x65	700
	Pandora	141,70	0,629	110x86x62	700
	Epimetėjas	151,42	0,694	140x110x100	700
	Janas	151,47	0,695	200x190x150	670
	Mimas	185,52	0,942	398	1140
	Enceladas	238,02	1,370	498	1220
	Tetija	294,66	1,888	1060	1200
	Dionė	377,40	2,737	1118	1440
	Rėja	527,04	4,518	1528	1340
	Titanas	1221,85	15,945	5150	1880
	Hiperionas	1481,1	21,277	370x280x220	1400
	Japetas	3561,3	79,330	1436	1210
	Febė	12952	550,48	230x220x210	700
Uranas	Portija	66,09	0,513	110	
	Pukas	86,01	0,762	154	
	Miranda	129,4	1,413	480x468x466	1200
	Arijelis	191,0	2,520	1158	1560
	Umbrielis	266,3	4,144	1169	1500
	Titanija	435,9	8,706	1578	1710
	Oberonas	583,5	13,463	1522	1630
	Sikoraksas	12213	1289	160	

4 lentelės tęsinys

Planeta	Palydovas	Orbitos spindulys 10^3 km	Apskriejimo periodas paromis	Skersmuo km	Tankis kg·m^{-3}
Neptūnas	Despina	52,53	0,33	150	
	Galatėja	61,95	0,43	160	
	Larisa	73,55	0,55	208x180	
	Protėjas	117,64	1,12	436x416x402	
	Tritonas	354,76	5,88	2705	2070
	Nereidė	5513,40	360,14	340	
Plutonas	Charonas	19,13	6,39	1172	2240

5 lentelė. DIDŽIAUSI PASAULIO OPTINIAI TELESKOPAI

Veidrodžio skersmuo m	Teleskopo ir observatorijos pavadinimas	Vieta	Aukštis m
8,2 x 4 (ekv. 16,4)	Labai didelis teleskopas, VLT (*Very Large Telescope*), Europos pietų pusrutulio observatorija	Cerro Paranal, Čilė	2635
10,0 x 2 (ekv. 14,1)	Keko (*Keck*) teleskopai I ir II, Mauna Kea observatorija	Havajai, JAV	4150
8,4 x 2 (ekv. 11,8)	Didelis binokulinis teleskopas, LBT (*Large Binocular Telescope*), Maunt Grehemo Observatorija	Arizona, JAV	3170
10,4	Didelis Kanarų teleskopas, GTC (*Gran Telescopio Canarias*), La Palma observatorija	Kanarų salos, Ispanija	2400
9,2	Hobio-Eberlio teleskopas, HET (*Hobby-Eberly Telescope*), Mak Donaldo observatorija	Techasas, JAV	2070
9,2	Didelis Pietų Afrikos teleskopas, SALT (*Southern African Large Telescope*), Pietų Afrikos observatorija	Saterlendas, Pietų Afrika	1798
8,3	*Subaru* teleskopas, Japonijos nacionalinė observatorija	Mauna Kea, Havajai	4140
8,1	Teleskopas-dvynys (šiaurės), *Gemini* observatorija	Mauna Kea, Havajai	4214
8,1	Teleskopas-dvynys (pietų), *Gemini* observatorija	Cerro Pachon, Čilė	2715
6,5	Daugelio veidrodžių teleskopas (buvusio 6 mažų veidrodžių teleskopo pavadinimas), MMT (*Multiple Mirror Telescope*), MMT observatorija	Arizona, JAV	2606
6,5 x 2	Magelano teleskopai I ir II (kitaip V. Badės (*W. Baade*) ir L. Klėjaus (*L. Clay*) teleskopai), Las Campanas observatorija	La Serena, Čilė	2280
6,0	Didelis azimutinis teleskopas, BTA (*Bolšoi Teleskop Azimutalnij*), Rusijos specialioji astrofizikos observatorija	Šiaurės Kaukazas, Rusija	2070
6,0	Didelis zenitinis teleskopas (veidrodis iš besisukančio gyvsidabrio), LZT (*Large Zenith Telescope*), Britų Kolumbijos universitetas	Britų Kolumbija, Kanada	395
5,0	Heilo (*G. E. Hale*) teleskopas, Maunt Palomaro observatorija	Kalifornija, JAV	1706
4,2	V. Heršelio (*W. Herschel)* teleskopas, WHT, La Palma observatorija	Kanarų salos, Ispanija	2332
4,2	Pietų astrofizikinių tyrimų teleskopas, SOAR (*Southern Astrophysical Research*) Telescope, Cerro Tololo Amerikos šalių observatorija	Cerro Pachon, Čilė	2701
4,0	Blanko (*V. M. Blanco*) teleskopas, Cerro Tololo Amerikos šalių observatorija	Cerro Tololo, Čilė	2215

6 lentelė. DIDŽIAUSIO REGIMOJO SPINDESIO ŽVAIGŽDĖS

Vardas	Žymėjimas	Ryškis *V*	Spektrinė klasė	Nuotolis pc	Nuotolis šm	Pastabos
Sirijus	α CMa	-1,46	A1 V	2,63	8,58	Vizualinė dvinarė. Sirijus B – baltoji nykštukė
Kanopas	α Car	−0,72	F0 Ib	95	313	
Tolimanas	a Cen	−0,29	G2 V + K0 V	1,335	4,354	Vizualinė dvinarė
Arktūras	α Boo	−0,04	K1 III	11,3	37	Sferoido žvaigždė
Vega	α Lyr	0,03	A0 V	7,66	25	Supa dulkių ir meteoroidų diskas
Tikutis	α Aur	0,08	G5 III + G0 III	12,9	42	Spektrinė dvinarė
Rygelis	β Ori	0,12	B8 I	236	770	
Prokionas	α CMi	0,38	F5 IV–V	3,50	11,4	Vizualinė dvinarė. Prokionas B – baltoji nykštukė
Betelgeizė	α Ori	0,4–1,3	M2 Iab	132	430	Pusiau taisyklinga kintamoji

Vardas	Žymėjimas	Ryškis V	Spektrinė klasė	Nuotolis pc	Nuotolis šm	Pastabos
Achernaras	α Eri	0,46	B3 V	43	140	
Hadaras	β Cen	0,61	B1 III	159	520	
Altayras	α Aql	0,77	A7 IV–V	5,21	17	
Akruksas	α Cru	0,90	B1 IV+B1 V+B4 IV	98	320	Vizualinė trinarė
Aldebaranas	a Tau	0,85	K5 III	19,9	65	
Spika	α Vir	0,97–1,04	B1 V + B3 V	80	260	Spektrinė dvinarė, Cefėjo β tipo kintamoji
Antaris	α Sco	0,9–1,8	M1 Ia + B4 V	184	600	Spektrinė dvinarė, pusiau taisyklinga kintamoji
Poluksas	β Gem	1,14	K0 III	10,4	34	
Fomalhautas	α PsA	1,16	A3 V	7,66	25	Supa dulkių ir met. diskas
Denebas	α Cyg	1,25	A2 Ia	512	1670	
Mimoza	β Cru	1,23–1,31	B0,5 III	153	500	Spektrinė trinarė, Cefėjo β tipo kintamoji
Regulas	α Leo	1,35	B7 V	23,6	77	
Adara	ε CMa	1,50	B2 II	132	430	
Kastoras	α Gem	1,58	A1+ A2 V	15,9	52	Vizualinė dvinarė ir spektrinė šešianarė

7 lentelė. 25 ARTIMIAUSIOS ŽVAIGŽDĖS IR JŲ SISTEMOS

Pavadinimas	Žvaigždynas	Paralaksas (″)	Nuotolis pc	Nuotolis šm	Ryškis V	Spektrinė klasė	Šviesis $L/L_{\odot}$
Saulė	–	–	–	–	–26,7	G2 V	1,0
Tolimanas A	α Cen	0,749	1,335	4,354	0,01	G2 V	1,43
B		0,749	1,335	4,354	1,34	K0 V	0,43
C		0,772	1,295	4,224	11,09	M5,5 V	0,00005
Barnardo žv.	Oph	0,545	1,83	5,98	10,37	M4 V	0,00043
Wolf 359	Leo	0,418	2,39	7,80	13,45	M6 V	0,00002
Lalande 21185	UMa	0,395	2,53	8,23	7,47	M2 V	0,0052
Luyten 726–8 A	Cet	0,381	2,62	8,55	12,41	M5,5 V	0,00006
B	UV Cet				13,2	M6 V	0,00003
Sirijus A	α CMa	0,380	2,63	8,58	–1,43	A1 V	20,7
B					8,44	DA2	0,0025
Ross 154	Sgr	0,341	2,93	9,56	10,47	M3,5 V	0,00047
Ross 248	And	0,316	3,16	10,31	12,29	M5,5 V	0,00010
Eridano ε	ε Eri	0,306	3,27	10,67	3,73	K2 V	0,27
Ross 128	Vir	0,301	3,32	10,83	11,12	M4 V	0,00033
Luyten 789–6 (ABC)	Aqr	0,294	3,40	11,09	12,33	M5 V	0,00011
Groombridge 34 A	GX And	0,290	3,45	11,25	8,08	M1,5 V	0,0057
B	GQ And				11,07	M3,5 V	0,00036
Indėno ε	ε Ind	0,289	3,46	11,29	4,68	K5 Ve	0,13
Gulbės 61 A	61 Cyg	0,289	3,46	11,30	5,22	K5 V	0,082
B					6,03	K7 V	0,039
BD+59° 1915 A	Dra	0,286	3,50	11,41	8,90	M3 V	0,0027
B					9,68	M3,5 V	0,0013
Banginio τ	τ Cet	0,286	3,50	11,41	3,50	G8 Vp	0,39
Prokyonas A	α CMi	0,286	3,50	11,41	0,38	F5 IV–V	6,85
B					10,7	DA*	0,00052
Lacaille 9352	PsA	0,284	3,52	11,48	7,34	M1,5 V	0,012
Gliese 1111	Cnc	0,276	3,62	11,82	14,79	M6,5 V	0,00001
Gliese 1061	Hor	0,270	3,70	12,07	13,03	M5,5 V	0,00007
Luyten 725–32	Cet	0,267	3,75	12,22	12,05	M4,5 V	0,00017
BD+5° 1668	CMi	0,264	3,79	12,35	9,86	M3,5 V	0,0013
Lacaille 8760	Mic	0,259	3,86	12,59	6,67	M0 V	0,027
Kapteino žv.	Pic	0,258	3,88	12,64	8,84	M0 V	0,0036
Krüger 60 A	Cep	0,252	3,97	12,95	9,85	M3 V	0,0014
B	DO Cep				11,3	M4 V	0,00039

* Sirijus B ir Prokionas B – baltosios nykštukės.

8 lentelė. NORMALIEJI SPALVOS RODIKLIAI ($B-V_0$) ĮVAIRIŲ SPEKTRINIŲ IR ŠVIESIO KLASIŲ ŽVAIGŽDĖMS

Sp	V	IV	III	II	I
O5	−0,33	−0,33	−0,33	−0,33	−0,33
O6	−0,32	−0,32	−0,32	−0,32	−0,32
O7	−0,32	−0,32	−0,32	−0,32	−0,32
O8	−0,31	−0,31	−0,31	−0,31	−0,30
O9	−0,31	−0,31	−0,31	−0,29	−0,27
B0	−0,30	−0,30	−0,30	−0,28	−0,23
B1	−0,27	−0,27	−0,27	−0,26	−0,19
B2	−0,25	−0,24	−0,24	−0,23	−0,16
B3	−0,21	−0,20	−0,20	−0,20	−0,13
B5	−0,17	−0,17	−0,16	−0,16	−0,10
B6	−0,15	−0,15	−0,14	−0,14	−0,08
B7	−0,13	−0,13	−0,12	−0,12	−0,06
B8	−0,10	−0,10	−0,10	−0,10	−0,04
B9	−0,07	−0,07	−0,07	−0,07	−0,02
A0	−0,02	−0,02	−0,02	−0,02	−0,01
A1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
A2	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03
A3	0,09	0,09	0,08	0,07	0,05
A5	0,15	0,15	0,15	0,11	0,08
A7	0,20	0,20	0,20	0,18	0,12
F0	0,30	0,29	0,28	0,25	0,19
F2	0,36	0,35	0,34	0,30	0,26
F5	0,44	0,43	0,43	0,38	0,40
F8	0,52	0,53	0,54	0,58	0,58
G0	0,58	0,59	0,65	0,71	0,75
G2	0,62	0,63	0,76	0,81	0,90
G5	0,68	0,70	0,86	0,89	1,08
G8	0,75	0,80	0,94	0,99	1,27
K0	0,82	0,91	1,01	1,08	1,39
K1	0,86	1,00	1,08	1,14	1,45
K2	0,91	1,10	1,16	1,29	1,50
K3	0,97		1,29	1,40	1,55
K5	1,15		1,51	1,49	1,62
K7	1,35		–	1,58	–
M0	1,44		1,56	1,59	1,66
M1	1,47		1,58	1,59	1,69
M2	1,49		1,59	1,60	1,71
M3	1,51		1,60		1,73
M4	1,54		1,59		1,77
M5	1,58		1,56		1,80
M6	1,65		1,55		–

9 lentelė. ABSOLIUTINIAI RYŠKIAI M_V ĮVAIRIŲ SPEKTRINIŲ IR ŠVIESIO KLASIŲ ŽVAIGŽDĖMS

Sp	NAPS	V	IV	III	II	Ib	Iab	Ia
O5	−4,6	−5,6	−5,8	−6,0	−6,3	−6,6	−6,9	−7,2
O6	−4,0	−5,4	−5,7	−5,9	−6,3	−6,6	−6,9	−7,2
O7	−3,9	−5,2	−5,5	−5,8	−6,2	−6,5	−6,8	−7,2
O8	−3,7	−4,9	−5,2	−5,6	−6,1	−6,4	−6,7	−7,2
O9	−3,5	−4,5	−4,9	−5,3	−5,9	−6,3	−6,6	−7,2
B0	−3,1	−4,0	−4,4	−4,9	−5,6	−6,1	−6,5	−7,2
B1	−2,3	−3,3	−3,9	−4,5	−5,2	−5,9	−6,4	−7,2
B2	−1,6	−2,5	−3,1	−3,7	−5,0	−5,9	−6,4	−7,2
B3	−1,0	−1,7	−2,3	−3,0	−4,8	−5,9	−6,4	−7,2
B5	−0,1	−0,8	−1,2	−1,7	−4,6	−5,9	−6,4	−7,2
B6	0,3	−0,5	−0,9	−1,3	−4,4	−5,8	−6,4	−7,2
B7	0,6	−0,2	−0,6	−1,0	−4,2	−5,8	−6,4	−7,2
B8	1,0	0,1	−0,3	−0,7	−3,9	−5,8	−6,4	−7,2
B9	1,4	0,5	0,1	−0,4	−3,6	−5,7	−6,4	−7,2
A0	1,6	0,8	0,4	−0,1	−3,4	−5,5	−6,4	−7,2
A1	1,7	1,1	0,7	0,2	−3,2	−5,3	−6,4	−7,2

9 lentelės tęsinys

Sp	NAPS	V	IV	III	II	Ib	Iab	Ia
A2	1,8	1,3	0,9	0,4	-3,1	-5,2	-6,4	-7,3
A3	1,9	1,5	1,0	0,5	-3,0	-5,1	-6,4	-7,3
A5	2,3	1,9	1,4	0,8	-2,9	-5,0	-6,5	-7,5
A7	2,6	2,3	1,7	1,1	-2,8	-5,0	-6,7	-7,7
F0	3,0	2,8	2,2	1,5	-2,7	-5,0	-6,9	-7,9
F2	3,2	3,1	2,4	1,8	-2,6	-4,9	-7,0	-8,0
F5	3,7	3,6	2,6	2,0	-2,6	-4,8	-7,1	-8,0
F8	4,2	4,1	2,8		-2,5	-4,7	-7,2	-8,1
G0	4,5	4,4	2,9		-2,4	-4,6	-7,2	-8,2
G2		4,7	3,0	1,1	-2,4	-4,5	-7,2	-8,2
G5		5,1	3,1	1,0	-2,4	-4,4	-7,2	-8,2
G8		5,6	3,2	0,9	-2,5	-4,3	-7,0	-8,1
K0		6,0	3,2	0,8	-2,5	-4,3	-6,8	-7,9
K1		6,2	3,2	0,8	-2,5	-4,3	-6,7	-7,7
K2		6,5		0,7	-2,5	-4,3	-6,6	-7,6
K3		6,7		0,6	-2,5	-4,3	-6,5	-7,5
K4		7,0		0,5	-2,6	-4,4	-6,4	-7,4
K5		7,3		0,3	-2,6	-4,4	-6,2	-7,2
K7		8,1		0,0	-2,7	-4,5	-6,0	-7,0
M0		8,9		-0,6	-2,8	-4,6	-5,8	-6,9
M1		9,4		-0,8	-2,9	-4,6	-5,8	-6,8
M2		10,0		-0,9	-3,0	-4,7	-5,8	-6,7
M3		10,5		-1,0	-3,0	-4,7	-5,8	-6,7
M4		11,5		-0,6	-3,1	-4,7	-5,8	-6,7
M5		13,5		-0,1	-3,1	-4,7	-5,8	-6,7

10 lentelė. BOLOMETRINIAI ABSOLIUTINIAI RYŠKIAI M_{bol} ĮVAIRIŲ SPEKTRINIŲ IR ŠVIESIO KLASIŲ ŽVAIGŽDĖMS

Sp	NAPS	V	IV	III	II	Ib	Iab	Ia
O5	-8,7	-9,8	-10,0	-10,2	-10,3	-10,4	-10,7	-11,0
O6	-8,0	-9,3	-9,6	-9,8	-9,9	-10,2	-10,4	-10,8
O7	-7,5	-8,8	-9,1	-9,3	-9,5	-9,8	-10,1	-10,5
O8	-7,2	-8,3	-8,6	-8,9	-9,2	-9,6	-9,8	-10,4
O9	-6,7	-7,6	-8,1	-8,4	-8,9	-9,3	-9,6	-10,2
B0	-6,2	-7,0	-7,4	-7,9	-8,1	-8,6	-9,0	-9,7
B1	-4,9	-5,8	-6,3	-6,8	-7,4	-8,0	-8,6	-9,4
B2	-4,0	-4,7	-5,3	-5,9	-6,8	-7,6	-8,2	-9,0
B3	-2,8	-3,6	-4,1	-4,7	-6,2	-7,3	-7,8	-8,6
B5	-1,4	-2,1	-2,5	-3,0	-5,4	-6,8	-7,3	-8,1
B6	-0,9	-1,6	-2,0	-2,4	-5,2	-6,6	-7,2	-7,9
B7	-0,2	-1,0	-1,4	-1,8	-4,8	-6,4	-7,0	-7,8
B8	0,4	-0,4	-0,8	-1,2	-4,4	-6,2	-6,9	-7,6
B9	1,0	0,1	-0,2	-0,8	-4,0	-6,0	-6,8	-7,5
A0	1,4	0,7	0,2	-0,3	-3,6	-5,7	-6,6	-7,4
A1	1,6	0,9	0,5	-0,1	-3,3	-5,5	-6,6	-7,4
A2	1,7	1,2	0,7	0,1	-3,1	-5,3	-6,5	-7,4
A3	1,9	1,5	1,0	0,4	-3,0	-5,2	-6,4	-7,4
A5	2,3	1,9	1,4	0,8	-2,8	-5,0	-6,4	-7,4
A7	2,6	2,3	1,8	1,1	-2,7	-4,9	-6,5	-7,6
F0	3,0	2,9	2,2	1,6	-2,6	-4,8	-6,7	-7,8
F2	3,2	3,1	2,4	1,8	-2,5	-4,8	-6,8	-7,9
F5	3,7	3,6	2,6	2,0	-2,5	-4,7	-7,0	-7,9
F8	4,2	4,1	2,8		-2,4	-4,6	-7,1	-8,0
G0	4,4	4,4	2,9		-2,4	-4,6	-7,2	-8,1
G2	4,6	4,6	2,9	1,0	-2,4	-4,6	-7,2	-8,2
G5		5,1	3,0	0,8	-2,5	-4,5	-7,3	-8,3
G8		5,5	3,1	0,6	-2,7	-4,5	-7,2	-8,3
K0		5,8	3,0	0,5	-2,8	-4,6	-7,1	-8,2
K1		5,9	3,0	0,4	-2,9	-4,6	-7,1	-8,1
K2		6,0		0,2	-3,0	-4,7	-7,0	-8,0
K3		6,2		-0,1	-3,1	-4,9	-7,0	-8,0
K4		6,4		-0,4				

10 lentelės tęsinys

Sp	NAPS	V	IV	III	II	Ib	Iab	Ia
K5		6,7		–0,9	–3,7	–5,4	–7,0	–8,0
K7		7,3						
M0		7,5		–1,8	–4,0	–5,8	–7,0	–8,1
M1		7,9		–2,4	–4,3	–6,0	–7,2	–8,2
M2		8,3		–2,6	–4,5	–6,2	–7,4	–8,3
M3		8,8		–2,9	–5,1	–6,7	–7,8	–8,7
M4		9,3		–3,1	–5,7	–7,3	–8,4	–9,3
M5		11,0		–3,2	–6,3	–8,0	–9,1	–10,0
M6				–3,6				

11 lentelė. EFEKTINIŲ TEMPERATŪRŲ LOGARITMAI lg T_{ef} IR BOLOMETRINĖS PATAISOS *BC* ĮVAIRIŲ SPEKTRINIŲ IR ŠVIESIO KLASIŲ ŽVAIGŽDĖMS

Sp	lg T_{ef}				*BC*			
	V	V–III	III	I–II	V	V–III	III	I–II
O5		4,626		4,618		–4,15		–3,80
O6		4,593		4,585		–3,90		–3,55
O7		4,568		4,556		–3,65		–3,30
O8		4,550		4,535		–3,40		–3,15
O9		4,525		4,512		–3,15		–2,95
B0		4,498		4,431		–2,95		–2,50
B1		4,423		4,371		–2,60		–2,15
B2		4,362		4,307		–2,20		–1,75
B3		4,286		4,243		–1,85		–1,40
B5		4,188		4,137		–1,30		–0,90
B6		4,152		4,100		–1,05		–0,75
B7		4,107		4,068		–0,80		–0,60
B8		4,061		4,041		–0,55		–0,45
B9		4,017		4,013		–0,35		–0,35
A0		3,982		3,991		–0,25		–0,25
A1		3,973		3,978		–0,16		–0,16
A2		3,961		3,964		–0,10		–0,10
A3		3,949		3,949		–0,03		–0,03
A5		3,924		3,919		0,02		0,05
A7		3,903		3,897		0,02		0,09
F0		3,863		3,869		0,02		0,13
F2		3,845		3,851		0,01		0,11
F5		3,813		3,813		–0,02		0,08
F8	3,789		3,782	3,778		–0,03		0,03
G0	3,774		3,763	3,756		–0,05		0,00
G2	3,763		3,740	3,732		–0,07		–0,05
G5	3,740		3,712	3,699	–0,09		–0,22	–0,13
G8	3,720		3,695	3,663	–0,13		–0,28	–0,22
K0	3,703		3,681	3,643	–0,19		–0,37	–0,29
K1	3,695		3,663	3,633			–0,43	–0,35
K2	3,686		3,648	3,623	–0,30		–0,49	–0,42
K3	3,672		3,628	3,613			–0,66	–0,57
K4	3,663		3,613				–0,86	–0,75
K5	3,643		3,602	3,585	–0,62		–1,15	–1,17
K7	3,602				–0,89			
M0	3,591		3,591	3,568	–1,17		–1,25	–1,25
M1	3,574		3,580	3,556	–1,45		–1,45	–1,40
M2	3,550		3,574	3,544	–1,71		–1,65	–1,60
M3	3,531		3,562	3,518	–1,92		–1,95	–2,00
M4	3,512		3,550	3,491	–2,24		–2,40	–2,60

12 lentelė. GRAVITACIJOS PAGREIČIŲ LOGARITMAI lg *g* ĮVAIRIŲ SPEKTRINIŲ IR ŠVIESIO KLASIŲ ŽVAIGŽDĖMS

Sp	NAPS	V	IV	III	II	Ib	Iab	Ia
O5	4,13	3,90	3,86	3,82	3,76	3,74	3,69	
O6	4,16	3,86	3,80	3,76	3,69	3,64	3,60	3,53
O7	4,18	3,85	3,80	3,74	3,64	3,57	3,52	3,45
O8	4,17	3,87	3,81	3,75	3,62	3,53	3,49	3,39
O9	4,21	3,95	3,82	3,74	3,58	3,50	3,44	3,31
B0	4,21	4,00	3,88	3,74	3,39	3,27	3,19	3,05
B1	4,22	4,00	3,86	3,71	3,31	3,17	3,01	2,87
B2	4,28	4,06	3,88	3,68	3,19	3,00	2,84	2,68
B3	4,31	4,06	3,89	3,71	3,12	2,79	2,68	2,49
B5	4,32	4,10	3,98	3,81	2,90	2,52	2,40	2,22
B6	4,32	4,09	3,96	3,84	2,77	2,42	2,29	2,13
B7	4,35	4,07	3,95	3,82	2,77	2,33	2,21	2,02
B8	4,34	4,07	3,92	3,79	2,79	2,27	2,11	1,97
B9	4,34	4,03	3,94	3,75	2,81	2,20	2,04	1,88
A0	4,32	4,07	3,91	3,75	2,85	2,23	2,01	1,81
A1	4,35	4,10	3,96	3,78	2,88	2,22	1,96	1,76
A2	4,32	4,16	3,98	3,78	2,87	2,23	1,92	1,71
A3	4,34	4,20	4,03	3,83	2,85	2,20	1,86	1,65
A5	4,36	4,22	4,06	3,86	2,81	2,14	1,74	1,53
A7	4,36	4,26	4,10	3,86	2,75	2,08	1,65	1,38
F0	4,32	4,28	4,05	3,83	2,67	2,00	1,51	1,25
F2	4,30	4,26	4,01	3,81	2,63	1,92	1,39	1,15
F5	4,32	4,28	3,93	3,74	2,48	1,81	1,22	1,00
F8	4,39	4,35	3,89		2,38	1,71	1,06	0,83
G0	4,39	4,39	3,84		2,29	1,62	0,95	0,72
G2	4,40	4,40	3,77	3,20	2,20	1,53	0,86	0,61
G5		4,49	3,71	3,07	2,04	1,45	0,71	0,45
G8		4,55	3,64	2,95	1,84	1,30	0,60	0,30
K0		4,57	3,57	2,89	1,74	1,20	0,54	0,25
K1		4,55	3,55	2,78	1,66	1,16	0,54	0,25
K2		4,55		2,63	1,59	1,10	0,48	0,23
K3		4,56		2,36	1,52	1,00	0,46	0,19
K4		4,57		2,16				
K5		4,57		1,93	1,20	0,77	0,35	0,10
K7		4,62						
M0		4,61		1,63	1,01	0,61	0,30	0,00
M1		4,67		1,41	0,84	0,51	0,19	−0,07
M2		4,69		1,31	0,70	0,39	0,09	−0,13
M3		4,71		1,12	0,38	0,10	−0,16	−0,34
M4		4,77		0,98				
M5		5,06		−0,76				
M6				−0,52				

13 lentelė. MASIŲ, IŠREIKŠTŲ SAULĖS MASĖMIS, LOGARITMAI lg $M/M_{\odot}$ ĮVAIRIŲ SPEKTRINIŲ IR ŠVIESIO KLASIŲ ŽVAIGŽDĖMS

Sp	NAPS	V	IV	III	II	Ib	Iab	Ia
O5	1,60	1,81	1,85	1,89	1,90	1,92	1,99	
O6	1,48	1,70	1,76	1,80	1,80	1,87	1,91	2,00
O7	1,40	1,59	1,65	1,68	1,71	1,76	1,83	1,92
O8	1,34	1,48	1,54	1,60	1,65	1,72	1,76	1,90
O9	1,28	1,38	1,45	1,49	1,58	1,66	1,72	1,83
B0	1,20	1,30	1,34	1,40	1,40	1,48	1,56	1,70
B1	1,04	1,11	1,18	1,23	1,28	1,38	1,46	1,64
B2	0,92	0,99	1,04	1,08	1,18	1,30	1,38	1,54
B3	0,78	0,84	0,88	0,94	1,11	1,23	1,32	1,45
B5	0,62	0,68	0,72	0,75	1,00	1,18	1,26	1,40
B6	0,56	0,61	0,64	0,68	0,94	1,15	1,26	1,38
B7	0,49	0,53	0,57	0,60	0,91	1,11	1,23	1,36
B8	0,43	0,48	0,49	0,52	0,88	1,08	1,20	1,34
B9	0,36	0,41	0,45	0,49	0,85	1,04	1,20	1,32
A0	0,32	0,35	0,39	0,43	0,81	1,04	1,18	1,30

13 lentelės tęsinys

Sp	NAPS	V	IV	III	II	Ib	Iab	Ia
A1	0,31	0,34	0,36	0,41	0,78	1,00	1,18	1,30
A2	0,29	0,32	0,34	0,39	0,75	0,98	1,15	1,30
A3	0,27	0,30	0,32	0,36	0,75	0,97	1,11	1,30
A5	0,23	0,26	0,29	0,33	0,74	0,95	1,11	1,30
A7	0,20	0,22	0,26	0,30	0,73	0,94	1,15	1,32
F0	0,16	0,16	0,20	0,23	0,72	0,93	1,20	1,38
F2	0,13	0,13	0,16	0,20	0,72	0,93	1,20	1,40
F5	0,08	0,08	0,13	0,18	0,72	0,93	1,26	1,40
F8	0,04	0,04	0,11		0,72	0,93	1,28	1,41
G0	0,02	0,02	0,10		0,72	0,93	1,30	1,43
G2	0,00	0,00	0,10	0,33	0,72	0,93	1,30	1,45
G5		-0,02	0,08	0,39	0,73	0,94	1,32	1,46
G8		-0,04	0,08	0,42	0,76	0,94	1,32	1,46
K0		-0,07	0,11	0,46	0,78	0,96	1,30	1,45
K1		-0,10	0,13	0,46	0,78	0,96	1,30	1,45
K2		-0,10		0,45	0,79	0,98	1,28	1,43
K3		-0,12		0,38	0,80	1,00	1,30	1,43
K4		-0,15		0,36				
K5		-0,19		0,37	0,83	1,08	1,30	1,45
K7		-0,22						
M0		-0,26		0,48	0,83	1,15	1,32	1,46
M1		-0,30		0,54	0,83	1,18	1,34	1,48
M2		-0,35		0,54	0,81	1,18	1,36	1,50
M3		-0,40		0,52	0,84	1,20	1,38	1,56
M4		-0,52		0,51				
M5		--0,82		-0,41				
M6				-0,40				

14 lentelė. SPINDULIŲ, IŠREIKŠTŲ SAULĖS SPINDULIAIS, LOGARITMAI lg $R/R_\odot$ ĮVAIRIŲ SPEKTRINIŲ IR ŠVIESIO KLASIŲ ŽVAIGŽDĖMS

Sp	NAPS	V	IV	III	II	Ib	Iab	Ia
O5	0,95	1,17	1,21	1,25	1,28	1,30	1,36	
O6	0,87	1,13	1,19	1,23	1,27	1,33	1,37	1,45
O7	0,82	1,08	1,14	1,18	1,25	1,31	1,37	1,45
O8	0,80	1,02	1,08	1,14	1,23	1,31	1,35	1,47
O9	0,75	0,93	1,03	1,09	1,22	1,30	1,36	1,48
B0	0,70	0,86	0,94	1,04	1,20	1,32	1,40	1,54
B1	0,59	0,77	0,87	0,97	1,20	1,32	1,44	1,60
B2	0,54	0,68	0,80	0,92	1,21	1,37	1,49	1,65
B3	0,45	0,61	0,71	0,83	1,21	1,43	1,53	1,69
B5	0,36	0,50	0,58	0,68	1,27	1,55	1,65	1,81
B6	0,34	0,48	0,56	0,64	1,30	1,58	1,70	1,84
B7	0,29	0,45	0,53	0,61	1,28	1,60	1,72	1,88
B8	0,26	0,42	0,50	0,58	1,26	1,62	1,76	1,90
B9	0,23	0,41	0,47	0,59	1,23	1,63	1,79	1,93
A0	0,22	0,36	0,46	0,56	1,20	1,62	1,80	1,96
A1	0,19	0,33	0,41	0,53	1,16	1,60	1,82	1,98
A2	0,20	0,30	0,40	0,52	1,15	1,59	1,83	2,01
A3	0,18	0,26	0,36	0,48	1,16	1,60	1,84	2,04
A5	0,15	0,23	0,33	0,45	1,18	1,62	1,90	2,10
A7	0,13	0,19	0,29	0,43	1,21	1,65	1,97	2,19
F0	0,13	0,15	0,29	0,41	1,24	1,68	2,06	2,28
F2	0,13	0,15	0,29	0,41	1,26	1,72	2,12	2,34
F5	0,09	0,11	0,31	0,43	1,30	1,77	2,23	2,41
F8	0,04	0,06	0,33		1,38	1,82	2,32	2,50
G0	0,03	0,03	0,34		1,43	1,87	2,39	2,57
G2	0,01	0,01	0,38	0,78	1,48	1,92	2,44	2,64
G5		-0,04	0,41	0,88	1,56	1,96	2,52	2,72
G8		-0,08	0,43	0,95	1,67	2,03	2,57	2,79
K0		-0,11	0,48	1,00	1,73	2,09	2,59	2,81
K1		-0,11	0,50	1,05	1,77	2,11	2,61	2,81
K2		-0,11		1,12	1,81	2,15	2,61	2,81

Sp	NAPS	V	IV	III	II	Ib	Iab	Ia
K3		−0,12		1,22	1,85	2,21	2,63	2,83
K4		−0,15		1,31				
K5		−0,17		1,44	2,03	2,37	2,69	2,89
K7		−0,20						
M0		−0,22		1,64	2,12	2,48	2,72	2,92
M1		−0,27		1,78	2,21	2,55	2,78	2,99
M2		−0,30		1,83	2,27	2,61	2,85	3,03
M3		−0,36		1,92	2,44	2,76	2,98	3,16
M4		−0,42		1,98				
M5		−0,72		~2,04				
M6				~2,16				

15 lentelė. SANTYKINIS ĮVAIRIŲ CHEMINIŲ ELEMENTŲ GAUSIS *A* SAULĖS FOTOSFEROJE (VANDENILIO GAUSIS IMAMAS 12,0)

Z	Elementas	*A* = lg*N*	*Z*	Elementas	*A* = lg*N*	*Z*	Elementas	*A* = lg*N*
1	H	12,0	29	Cu	4,1	57	La	1,1
2	He	10,9	30	Zn	4,4	58	Ce	1,6
3	Li	1,0	31	Ga	2,8	59	Pr	0,8
4	Be	1,1	32	Ge	3,4	60	Nd	1,2
5	B	2,3	33	As	–	61	Pm	–
6	C	8,7	34	Se	–	62	Sm	0,7
7	N	7,9	35	Br	–	63	Eu	0,7
8	O	8,8	36	Kr	–	64	Gd	1,1
9	F	4,6	37	Rb	2,6	65	Tb	–
10	Ne	7,7	38	Sr	2,9	66	Dy	1,1
11	Na	6,3	39	Y	2,1	67	Ho	–
12	Mg	7,6	40	Zr	2,8	68	Er	0,8
13	Al	6,4	41	Nb	2,0	69	Tm	0,3
14	Si	7,6	42	Mo	2,2	70	Yb	0,2
15	P	5,5	43	Tc	–	71	Lu	0,8
16	S	7,2	44	Ru	1,9	72	Hf	0,9
17	Cl	5,5	45	Rh	1,5	73	Ta	–
18	Ar	6,0	46	Pd	1,5	74	W	0,8
19	K	5,2	47	Ag	0,9	75	Re	<−0,3
20	Ca	6,3	48	Cd	2,0	76	Os	0,7
21	Sc	3,1	49	In	1,7	77	Ir	0,8
22	Ti	5,0	50	Sn	2,0	78	Pt	1,8
23	V	4,1	51	Sb	1,0	79	Au	0,8
24	Cr	5,7	52	Te	–	80	Hg	<2,1
25	Mn	5,4	53	I	–	81	Tl	0,9
26	Fe	7,6	54	Xe	–	82	Pb	1,9
27	Co	5,0	55	Cs	<2,1	83	Bi	<1,9
28	Ni	6,3	56	Ba	2,1	90	Th	0,2
						92	U	<0,6

16 lentelė. ŠVIESIAUSI DIFUZINIAI ŪKAI

Pavadinimas	Žvaigždynas	α(2000) h m	δ(2000) ° ′	Kampinis dydis (°)	Nuotolis pc	Nuotolis šm	Tipas
NGC 1435 (Meropė)	Tau	03 48	+24 05	0,5	120	400	Atsp. + tams.
NGC 1499 (Kalifornija)	Per	04 03	+36 25	2,5×0,7	610	2 000	H II
IC 2118 (Raganos Galva)	Eri	05 05	−07 10	1×2	280	900	atsp.
NGC 1952 = M1 (Krabas)	Tau	05 34	+22 01	6′×4′	1 780	5 800	SN
NGC 1976 = M42 (D. Oriono ūkas)	Ori	05 35	−05 24	1	460	1 500	H II
NGC 1977	Ori	05 36	−04 50	0,7×0,4	460	1 500	H II + atsp.

Pavadinimas	Žvaigždynas	α(2000) h m	δ(2000) ° ′	Kampinis dydis (°)	Nuotolis pc	Nuotolis šm	Tipas
NGC 2070 (Tarantulas)	Dor	05 39	−69 05	0,5	49 000	160 000	H II
Simeiz 147 (Šaino ūkas)	Tau	05 41	+27 50	3	800	2 500	SN
IC 434 (Arklio Galva)	Ori	05 41	−02 30	1×0,5	460	1 500	H II + tams.
NGC 2024 (Liepsna)	Ori	05 42	−01 50	0,4	460	1 500	H II + tams.
NGC 2244 (Rozetė)	Mon	06 32	+05 00	1	1 440	4 700	H II
NGC 2264 (Kūgis)	Mon	06 38	+10 00	2	670	2 200	H II
Gamo ūkas	Vel	08 30	−45 00	3×6	400	1 300	SN
NGC 3372 (Kilio η ūkas)	Car	10 45	−59 40	1,4	1 990	6 500	H II
Gyvatnešio ρ ūkas	Oph	16 25	−23 30	5	150	500	atsp. + tams.
NGC 6514 = M20 (Trilypis)	Sgr	18 02	−23 00	0,5	670	2 200	H II + tams.
NGC 6523 = M8 (Lagūna)	Sgr	18 04	−24 24	1×0,5	1 320	4 300	H II
NGC 6611 = M16 (Erelis)	Ser	18 19	−13 50	0,5	1 750	5 700	H II + tams.
NGC 6618 = M17 (Omega)	Sgr	18 21	−16 12	0,7	1 010	3 300	H II
NGC 6960/95 (Tinklas)	Cyg	20 46	+30 40	2,5	800	2 600	SN
IC 5067/70 (Pelikanas)	Cyg	20 51	+44 00	1,3	490	1 600	H II
NGC 7000 (Š. Amerika)	Cyg	21 00	+44 30	2	490	1 600	H II

17 lentelė. ŠVIESIAUSI PLANETIŠKIEJI ŪKAI

Pavadinimas	Žvaigždynas	α(2000) h m	δ(2000) ° ′	Kampinis dydis (′)	Suminis ryškis	Nuotolis pc	Nuotolis šm
NGC 246	Cet	00 46,5	−11 53	5×6	8,5	460	1500
NGC 2392 (Eskimas)	Gem	07 29,0	+20 55	0,8	8,3	1260	4100
NGC 3132	Ant	10 06,1	−40 26	1,4×0,9	8,2	1260	4100
NGC 3242	Hya	10 24,4	−18 38	0,7×0,6	9,0	920	3000
NGC 3587 = M97 (Pelėda)	UMa	11 14,8	+55 01	3,5	12,0	1280	4200
NGC 3918	Cen	11 49,5	−57 11	0,2	8,4	1130	3700
NGC 6543 (Katės Akis)	Dra	17 58,0	+66 38	0,4	8,8	920	3000
NGC 6720 = M57 (Žiedas)	Lyr	18 53,6	+33 03	1,5×1,0	9,3	920	3000
NGC 6751 (Akies Rainelė)	Aql	19 05,7	−06 04	0,4	12,2	2580	8400
NGC 6826	Cyg	19 44,3	+50 31	0,4	8,8	1380	4500
NGC 6853 = M27 (Hantelis)	Vul	19 59,5	+22 43	8×4	7,6	400	1300
NGC 7009 (Saturnas)	Aqr	21 04,1	−11 23	0,5	8,4	1070	3500
NGC 7293 (Sraigė)	Aqr	22 29,6	−20 48	15×12	6,5	300	1000
IC 1470	Cep	23 05,1	+60 15	1,2×0,8	8,1	2080	6800
NGC 7635 (Burbulas)	Cas	23 20,2	+61 10	3	8,5	550	1800
NGC 7662	And	23 25,4	+42 30	0,5	8,9	1130	3700

18 lentelė. TARPŽVAIGŽDINĖJE IR APLINKŽVAIGŽDINĖJE MEDŽIAGOJE IKI 2002 m. RASTŲ MOLEKULIŲ SĄRAŠAS

Atomų skaičius	Molekulės formulė
2	CN, CH, CH^+, OH, CO, H_2, CS, SiO, SO, SiS, NS, C_2, NO, CO^+, MgO, NH, AlCl, KCl, AlF, SO, SO^+, HCl, CSi, SiN, SH, FeO, CP, NaCl, PN, NaH, HF, LiH
3	H_2O, HCN, HCO^+, OCS, HNC, H_2S, N_2H^+, C_2H, SO_2, HCO, c-SiC_2, N_2O, SO_2, HCS^+, HOC^+, $H^+{}_3$, H_2D^+, HNO, C_3, SiH_2, CO_2, MgCN, NaCN, NH_2, HNO, C_2S, AlCN, MgNC, MgCN, SiCN, AlNC, C_2O, CH_2
4	NH_3, H_2CO, HNCO, H_2CS, C_2H_2, C_3N, HNCS, C_3H, c-C_3H, C_3O, $HCNH^+$, HOCN, $HOCO^+$, H_3O^+, P_3N, C_3S, $HSiC_2$, HCCN, CH_3, C_2CN, H_2CN, H_2CO^+, ND_3, CH_2D^+, c-SiC_3
5	HC_3N, HCO_2H, H_2CNH, NH_2CN, H_2C_2O, CH_4, C_4H, CH_2NH, SiH_4, C_3H_2, c-C_3H_2, C_4N, CH_2CO, H_2NCN, HNCCC, CH_2CN, H_2CHN, C_4Si, H_2C_2O, HNC_3, CH_2CO, SiH_4, HCOOH, HCCNC, C_5, H_2COH^+
6	CH_3OH, $HCONH_2$, CH_3CN, CH_3NC, CH_3CH, CH_2CHO, CH_3SH, C_5H, H_2CHO, H_2CCH_2, C_2H_4, HCCCHO, H_2C_4, CH_2CHO, C_5O, HC_2CHO, HC_3NH, HC_3NH^+, C_5N, C_5S, NH_2CHO
7	CH_3CCH, CH_3CHO, CH_3NH_2, H_2C_2HCN, HC_5N, CH_2CHCN, $HCOCH_3$, CH_3C_2O, C_6H, NH_2CH_3, CH_3HCO, CH_2 CH(OH), HC_4CN, c-C_2H_4O
8	$HCOOCH_3$, CH_3COOH, $OHCH_2CHO$, CH_3C_2CN, H_2C_6, C_2H_6, C_7H
9	$(CH_3)_2O$, CH_3CH_2OH, HC_7N, CH_3CH_2CN, CH_3C_4H, C_2H_5OH, C_2H_5CN, HC_6CN, C_8H, CH_3OCH_3
10	NH_2CH_2COOH, $HOCH_2CH_2OH$, C_8H_2,CH_3COCH_3, CH_3C_4CN
11	HC_8CN
12	C_6H_6
13	$HC_{10}CN$
20–50	Kai kurie policikliniai aromatiniai angliavandeniliai

Pastaba. Priešdėlis c žymi ciklinę struktūrą

19 lentelė. ŠVIESIAUSI PADRIKIEJI ŽVAIGŽDŽIŲ SPIEČIAI

Pavadinimas	Žvaigž-dynas	α(2000) h m	δ(2000) ° ′	Kampinis dydis (′)	Suminis ryškis	Nuotolis pc	Nuotolis šm
NGC 752	And	01 57,8	+37 41	45	7,0	460	1500
NGC 869 = h Per	Per	02 19,0	+57 10	36	4,4	2200	7300
NGC 884 = χ Per	Per	02 22,4	+57 07	36	4,7	2200	7300
NGC 1039 = M34	Per	02 41,2	+42 47	40	5,5	490	1600
α Per spiečius	Per	03 22,0	+48 36	240	2,3	170	570
Sietynas = M45	Tau	03 47,1	+24 08	120	1,4	110	370
Hiados	Tau	04 20,0	+15 38	400	-	46,3	151
NGC 1912 = M38	Aur	05 28,6	+35 50	20	7,0	1100	3500
NGC 1960 = M36	Aur	05 35,3	+34 09	12	6,3	1300	4300
NGC 2099 = M37	Aur	05 52,4	+32 32	20	6,2	1400	4500
NGC 2168 = M35	Gem	06 08,8	+24 21	40	5,3	830	2700
NGC 2244 (Rozetė)	Mon	06 32,4	+04 52	40	6,2	1400	4700
NGC 2264 (S Mon)	Mon	06 41,0	+09 53	30	4,7	670	2200
NGC 2287 = M41	CMa	06 47,1	-20 44	30	5,0	830	2700
NGC 2353	Mon	07 14,4	-10 17	20	5,3	1100	3600
NGC 2422	Pup	07 35,6	-14 30	25	4,5	490	1600
NGC 2451	Pup	07 45,4	-37 58	40	3,6	300	980
NGC 2477	Pup	07 51,8	-38 33	25	5,7	1200	4000
NGC 2516	Car	07 58,3	-60 54	50	3,0	400	1300
NGC 2547	Vel	08 09,5	-49 16	15	5,1	460	1500
NGC 2546	Pup	08 12,5	-37 39	40	4,6	920	3000
NGC 2548	Hya	08 13,5	-05 47	30	5,3	770	2500
NGC 2632 (Prakartas)	Cnc	08 40,1	+20 00	90	3,7	180	580
IC 2391 (o Vel)	Vel	08 40,3	-53 03	45	2,6	170	570
IC 2395	Vel	08 41,0	-48 11	20	4,6	520	1700
NGC 2682 = M67	Cnc	08 50,4	+11 50	18	6,1	920	3000
NGC 3114	Car	10 02,6	-60 07	40	4,4	920	3000
IC 2581	Car	10 26,9	-57 38	5	5,2	2450	8000
IC 2602	Car	10 43,3	-64 23	70	1,6	160	525
NGC 3532	Car	11 06,4	-58 39	60	3,3	490	1600
NGC 3766	Cen	11 36,1	-61 37	12	5,1	1750	5700
Berenikės Garbanos	Com	12 25,1	+26 06	300	2,9	89	290
NGC 4755	Cru	12 53,6	-60 20	12	5,2	2000	6400

Pavadinimas	Žvaigždynas	α(2000) h m	δ(2000) ° ′	Kampinis dydis (′)	Suminis ryškis	Nuotolis pc	Nuotolis šm
(Bril. dėž.)							
NGC 6193	Ara	16 40,8	-48 46	20	5,0	1200	3800
NGC 6231	Sco	16 54,0	-41 48	16	3,5	1200	4000
(Sco OB1)							
NGC 6405 = M6	Sco	17 40,1	-32 13	25	5,0	490	1600
IC 4665	Oph	17 46,7	+05 44	50	5,5	350	1150
NGC 6475 = M7	Sco	17 53,9	-34 48	50	3,2	300	980
NGC 6494 = M23	Sgr	17 56,9	-19 01	30	5,9	610	2000
NGC 6530	Sgr	18 03,1	-24 23	45	5,2	1300	4300
(Lagūnoje)							
NGC 6633	Oph	18 27,4	+06 34	20	4,9	370	1200
IC 4725 = M25	Sgr	18 31,7	-19 15	40	6,2	610	2000
IC 4756	Ser	18 39,3	+05 27	60	5,1	490	1600
NGC 7092 = M39	Cyg	21 31,8	+48 26	30	5,2	320	1060
IC 1396	Cep	21 38,9	+57 30	60	5,1	400	1300

20 lentelė. ŠVIESIAUSI KAMUOLINIAI ŽVAIGŽDŽIŲ SPIEČIAI

Pavadinimas	Žvaigždynas	α(2000) h m	δ(2000) ° ′	Kampinis dydis (′)	Suminis ryškis	Nuotolis kpc	Nuotolis kšm
NGC 104 = 47 Tuc	Tuc	00 24,0	-72 04	44	4,0	4	13
NGC 1851	Col	05 14,0	-40 01	12	6,7	12	38
NGC 2808	Car	09 11,9	-64 47	19	6,1	9	29
NGC 5139 = ω Cen	Cen	13 26,8	-47 18	65	3,6	5	16
NGC 5272 = M3	CVn	13 42,2	+28 23	9	6,4	10	32
NGC 5904 = M5	Ser	15 18,5	+02 06	11	6,0	7	23
NGC 6121 = M4	Sco	16 23,6	-26 31	23	6,0	2	6,8
NGC 6205 = M13	Her	16 41,7	+36 28	13	5,9	7	22
NGC 6218 = M12	Oph	16 47,1	-01 57	22	6,9	5,5	18
NGC 6254 = M10	Oph	16 57,1	-04 07	16	6,6	4	13
NGC 6266 = M62	Oph	17 01,2	-30 07	5	6,5	7	22
NGC 6273 = M19	Oph	17 02,1	-26 16	5	6,8	8	27
NGC 6341 = M92	Her	17 17,1	+43 09	12	6,5	8	26
NGC 6388	Sco	17 35,7	-44 45	4	6,7	11	36
NGC 6397	Ara	17 40,8	-53 41	19	5,9	2,2	7,2
NGC 6541	CrA	18 08,0	-43 45	23	6,9	7	23
NGC 6656 = M22	Sgr	18 36,3	-23 55	26	5,1	3	10
NGC 6752	Pav	19 10,9	-59 59	42	5,8	4	12
NGC 6809 = M55	Sgr	19 40,1	-30 56	21	6,3	5	17
NGC 7078 = M15	Peg	21 30,1	+12 10	9	6,5	10	33
NGC 7089 = M2	Aqr	21 33,4	-00 50	7	6,5	11	36

21 lentelė. GALAKTIKŲ DUOMENYS

Galaktikų klasė	E ir dSph	S ir SB	Ir	Galaktika (Sbc)	M 31 (Sb)
Masė Saulės* vienetais	10^6–10^{13}	10^9–10^{12}	10^7–10^{11}	$2{,}5 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{11}$
Skersmuo (pc)**	10^2–$8 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^3$–$7 \cdot 10^4$	10^2–10^4	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$
Absoliutinis ryškis M_V	nuo -9 iki -25	nuo -15 iki -22	nuo -8 iki -20	−20,6	−21,1
M/L_V***	14–30	5–20	5	7	6

*Pastabos:** Neįskaitant nematomosios medžiagos. ** Neįskaitant vainikų. *** Vidutinis masės M ir šviesio L_V santykis Saulės vienetais

22 lentelė. VIETINĖ GALAKTIKŲ GRUPĖ

Galaktika	Tipas	α 2000	δ 2000	Nuotolis kpc	Nuotolis kšm.	Skersmuo kpc	Skersmuo kšm
Mūsų Galaktika	Sbc	17 45,7	−29 00	–	–	31	100
Šaulio SNG	dE7	18 55,0	−30 30	25	80	3	10
Didysis Magelano Deb.	Ir,SB	05 23,6	−69 47	49	160	9	30
Mažasis Magelano Deb.	Ir	00 52,8	−72 54	58	190	6	20
M. Grįžulo Ratų SNG	dE5	15 08,8	+67 07	61	200	2,8	9
Slibino SNG	dE3	17 20,2	+57 55	80	260	1,2	4
Skulptoriaus SNG	dE3	00 59,9	−33 42	85	280	2,1	7
Sekstanto SNG	dE	10 13,0	−01 37	86	280	0,9	3
Kilio SNG	dE4	06 41,6	−50 58	101	330	1,5	5
Krosnies SNG	dE3	02 39,6	−34 31	138	450	4,6	15
Liūto II SNG	dE0	11 13,5	+22 10	208	680	1,6	5
Liūto I SNG	dE3	10 08,4	+12 18	251	820	2	7
Fenikso NNG	dIr	01 51,1	−44 27	396	1290	1,5	5
NGC 6822	dIr	19 44,9	−14 46	500	1630	2,8	9
NGC 147	dE5	00 33,1	+48 31	659	2150	3	10
NGC 185	dE3	00 38,9	+48 20	659	2150	2,1	7
And I SNG	dE3	00 45,7	+38 00	699	2280	0,6	2
And II SNG	dE2	01 16,3	+33 25	699	2280	0,7	2
IC 1613	dIr	01 04,9	+02 07	724	2360	5	16
NGC 205	dE5	00 40,3	+41 41	751	2450	5	16
M32 (NGC 221)	dE2	00 42,7	+40 52	751	2450	2,5	8
M31 (NGC 224)	Sb	00 42,7	+41 16	751	2450	40	130
And III SNG	dE5	00 35,3	+36 31	751	2450	0,9	3
Banginio SNG	dE	00 26,2	−11 03	776	2530	2,1	7
M33 (NGC 598)	Sc	01 33,9	+30 39	794	2590	17	55
Žuvų NNG	dIr	01 03,9	+21 53	810	2640	0,4	1
And V SNG	dE	01 10,3	+47 38	810	2640	0,3	1
And VI SNG	dE	23 51,7	+24 36	828	2700	0,6	2
Tukanos SNG	dE	22 41,9	−64 25	871	2840	1,2	4
Banginio NNG = WLM	dIr	00 02,0	−15 28	926	3020	3,4	11
Vandenio NNG	dIr	20 46,9	−12 51	950	3100	1,2	4
Siurblio SNG	dE	10 04,1	−27 20	1010	3300	1,5	5
Šaulio NNG	dIr	19 30,8	−17 41	1100	3590	1,5	5
IC 10	dIr	00 20,4	+59 18	1250	4080	1,8	6

Pastabos: SNG – sferoidinės nykštukinės galaktikėlės; NNG – netaisyklingosios nykštukinės galaktikėlės.

23 lentelė. ŠVIESIAUSIOS GALAKTIKOS

NGC Nr.	M Nr.	Žvaigždynas	α (2000) h m	δ (2000) ° ′	Tipas	Dydis ′	Regimasis ryškis	Nuotolis Mpc	Nuotolis Mšm.
55		Scl	00 14,9	-39 11	Sc	32x6	8,2	3,10	10,1
185*		Cas	00 39,0	+48 20	E2	12x10	9,2	0,66	2,15
205*		And	00 40,4	+41 41	E5	17x10	8,0	0,75	2,45
224*	31	And	00 42,7	+41 16	Sb	180x60	3,5	0,75	2,45
221*	32	And	00 42,7	+40 52	E3	8x6	8,2	0,75	2,45
253		Scl	00 47,6	-25 17	Sc	25x7	7,1	4,20	13,7
SMC*		Tuc	00 52,7	-72 50	Ir	280x160	2,3	0,06	0,19
300		Scl	00 54,9	-37 41	Sc	20x15	8,3	2,02	6,6
598*	33	Tri	01 33,9	+30 39	Sc	80x50	5,7	0,79	2,59
628	74	Psc	01 36,7	+15 47	Sc	10x10	9,2	16,99	55,4
1068*	77	Cet	02 42,7	-00 01	Sb	7x6	8,8	25,00	81,5
LMC*		Dor	05 23,6	-69 45	Ir,SB	650x550	0,1	0,05	0,16
2403		Cam	07 36,9	+65 36	Sc	18x11	8,4	3,13	10,2
2903		Leo	09 32,2	+21 30	Sc	13x7	8,9	9,38	30,6
3031	81	UMa	09 55,6	+69 04	Sb	26x14	6,9	3,40	11,1
3034	82	UMa	09 55,8	+69 41	Ip	11x5	8,4	3,59	11,7
3115		Sex	10 05,2	-07 43	E7	8x3	9,2	8,00	26,1
3368	96	Leo	10 46,8	+11 49	Sb	7x5	9,2	9,75	31,8
3623	65	Leo	11 18,9	+13 05	Sb	10x3	9,3	8,49	27,7
3627	66	Leo	11 20,2	+12 59	Sb	9x4	9,0	8,74	28,5
4258	106	CVn	12 19,0	+47 18	Sb	18x8	8,3	7,73	25,2

NGC Nr.	M Nr.	Žvaigž-dynas	α (2000) h m	δ (2000) ° ′	Tipas	Dydis ′	Regima-sis ryškis	Nuotolis Mpc	Nuotolis Mšm.
4374	84*	Vir	12 25,1	+12 53	S0	5x4	9,3	13,80	45,0
4382	85*	Com	12 25,4	+18 11	S0	7x5	9,2	13,80	45,0
4406	86*	Vir	12 26,2	+12 57	E3	7x6	9,2	18,40	60,0
4449		CVn	12 28,2	+44 06	Ir	5x4	9,4	5,00	16,3
4472	49*	Vir	12 29,8	+08 00	E4	9x7	8,4	21,98	71,7
4486*	87*	Vir	12 30,8	+12 24	E1	7x7	8,6	18,40	60,0
4501	88*	Com	12 32,0	+14 25	Sb	7x4	9,5	13,80	45,0
4565*		Com	12 36,3	+25 59	Sb	16x3	9,5	15,33	50,0
4594*	104*	Vir	12 40,0	-11 37	Sb	9x4	8,3	16,86	55,0
4631		CVn	12 42,1	+32 32	Sc	15x3	9,3	11,96	39,0
4649	60*	Vir	12 43,7	+11 33	E1	7x6	8,8	21,98	71,7
4725		Com	12 50,4	+25 30	SBb	11x8	9,2	11,65	38,0
4736	94	CVn	12 50,9	+41 07	Sb	11x9	8,2	6,90	22,5
4826	64	Com	12 56,7	+21 41	Sb	9x5	8,5	6,99	22,8
4945		Cen	13 05,4	-49 28	SBc	20x4	7,8	6,99	22,8
5055*	63	CVn	13 15,8	+42 02	Sb	12x8	8,6	11,01	35,9
5128*		Cen	13 25,5	-43 01	S0p	18x14	7,0	3,50	11,4
5194*	51	CVn	13 29,9	+47 12	Sc	14x10	8,4	6,99	22,8
5236	83	Hya	13 37,0	-29 52	Sc	11x10	7,6	6,90	22,5
5457	101	UMa	14 03,2	+54 21	Sc	27x26	7,7	6,84	22,3
6744		Pav	19 09,8	-63 51	SBb	15x10	9,1	13,00	42,4
6822*		Aqr	19 44,9	-14 48	Ir	20x10	9,2	0,50	1,63
7793		Scl	23 57,8	-32 35	Sd	9x7	9,1	4,20	13,7

Pastabos: SMC ir LMC – Mažasis ir Didysis Magelano Debesys
NGC 185, NGC 205, NGC 224 (M31), NGC 221 (M32), NGC 598 (M33),
NGC 6822, SMC ir LMC – vietinės galaktikų grupės nariai (žr. **22** lentelę),
NGC 1068 (M77) – Seiferto rūšies galaktika,
NGC 4486 (M87) – Mergelės A radiogalaktika,
NGC 4565 – Verpstas,
NGC 4594 (M104) – Sombreras,
NCC 5055 (M63) – Saulėgrąža,
NGC 5128 – Kentauro A radiogalaktika,
NGC 5194 (M51) – Verpetas,
M49, M60, M84, M85, M86, M87, M88 ir M104 priklauso Mergelės galaktikų spiečiui.

24 lentelė. MŪSŲ VISATOS RAIDOS MODELIŲ DUOMENYS
(Tikimasi, kad daugumoje atvejų tikrovę atitinka ne blogiau kaip vienos eilės tikslumu)

Visatos amžius t		Temperatūra		Bendras visų materijos formų tankis ρ [kg·m⁻³]		$z+1=$
Sekundėmis	Kitais vnt.	$T = 10^{10} \cdot t^{-1/2}$ žr.(**9.31**)	$T = 1{,}52 \cdot 10^{12} \cdot t^{-2/3}$ žr.(**9.32**)	$\rho_1 = 5 \cdot 10^8 \cdot t^{-2}$ žr. (**9.34**)	$\rho_2 = 8 \cdot 10^8 \cdot t^{-2}$ žr. (**9.35**)	$T/2{,}728$
$1 \cdot 10^{-44}$		$1 \cdot 10^{32}$		$5 \cdot 10^{96}$	$3{,}7 \cdot 10^{31}$	
$1 \cdot 10^{-43}$		$3 \cdot 10^{31}$		$5 \cdot 10^{94}$	$1{,}1 \cdot 10^{31}$	
$1 \cdot 10^{-35}$		$3 \cdot 10^{27}$		$5 \cdot 10^{78}$	$1{,}1 \cdot 10^{27}$	
$1 \cdot 10^{-34}$		$1 \cdot 10^{27}$		$5 \cdot 10^{76}$	$3{,}7 \cdot 10^{26}$	
$1 \cdot 10^{-33}$		$3 \cdot 10^{26}$		$5 \cdot 10^{74}$	$1{,}1 \cdot 10^{26}$	
$1 \cdot 10^{-32}$		$1 \cdot 10^{26}$		$5 \cdot 10^{72}$	$3{,}7 \cdot 10^{25}$	
$1 \cdot 10^{-10}$		$1 \cdot 10^{15}$		$5 \cdot 10^{28}$	$3{,}7 \cdot 10^{14}$	
$1 \cdot 10^{-7}$		$3{,}2 \cdot 10^{13}$		$5 \cdot 10^{22}$	$1{,}2 \cdot 10^{13}$	
$1 \cdot 10^{-6}$		$1 \cdot 10^{13}$		$5 \cdot 10^{20}$	$3{,}7 \cdot 10^{12}$	
$1 \cdot 10^{-5}$		$3{,}2 \cdot 10^{12}$		$5 \cdot 10^{18}$	$1{,}2 \cdot 10^{12}$	
$1 \cdot 10^{-4}$		$1 \cdot 10^{12}$		$5 \cdot 10^{16}$	$3{,}7 \cdot 10^{11}$	
$1 \cdot 10^{-3}$		$3{,}2 \cdot 10^{11}$		$5 \cdot 10^{14}$	$1{,}2 \cdot 10^{11}$	
$1 \cdot 10^{-2}$		$1 \cdot 10^{11}$		$5 \cdot 10^{12}$	$3{,}7 \cdot 10^{10}$	
$1 \cdot 10^{-1}$		$3{,}2 \cdot 10^{10}$		$5 \cdot 10^{10}$	$1{,}2 \cdot 10^{10}$	
$2 \cdot 10^{-1}$		$2{,}2 \cdot 10^{10}$		$1{,}3 \cdot 10^{10}$	$8{,}1 \cdot 10^{9}$	
$3 \cdot 10^{-1}$		$1{,}8 \cdot 10^{10}$		$5{,}6 \cdot 10^{9}$		$6{,}7 \cdot 10^{9}$
$1 \cdot 10^{0}$		$1 \cdot 10^{10}$		$5 \cdot 10^{8}$		$3{,}7 \cdot 10^{9}$
$1 \cdot 10^{1}$		$3{,}2 \cdot 10^{9}$		$5 \cdot 10^{6}$		$1{,}2 \cdot 10^{9}$

Visatos amžius t		Temperatūra		Bendras visų materijos formų tankis ρ [$kg \cdot m^{-3}$]		$z+1=$
Sekundėmis	Kitais vnt.	$T = 10^{10} \cdot t^{-1/2}$ žr.(**9.31**)	$T = 1{,}52 \cdot 10^{12} \cdot t^{-2/3}$ žr.(**9.32**)	$\rho_1 = 5 \cdot 10^8 \cdot t^{-2}$ žr. (**9.34**)	$\rho_2 = 8 \cdot 10^8 \cdot t^{-2}$ žr. (**9.35**)	$T/2{,}728$
$1 \cdot 10^2$		$1 \cdot 10^9$		$5 \cdot 10^4$		$3{,}7 \cdot 10^8$
$2 \cdot 10^2$		$7{,}1 \cdot 10^8$		$1{,}3 \cdot 10^4$		$2{,}6 \cdot 10^8$
$3 \cdot 10^2$	5 min.	$5{,}8 \cdot 10^8$		$5{,}6 \cdot 10^3$		$2{,}1 \cdot 10^8$
$1 \cdot 10^3$	17 min.	$3{,}2 \cdot 10^8$		$5 \cdot 10^2$		$1{,}2 \cdot 10^8$
$1 \cdot 10^{11}$	3 200 m.	$3{,}2 \cdot 10^4$		$5 \cdot 10^{-14}$		$1{,}2 \cdot 10^4$
$2{,}5 \cdot 10^{11}$	8 000 m.	20 000		$8 \cdot 10^{-15}$		7 330
$1 \cdot 10^{12}$	$3{,}2 \cdot 10^4$ m.	10 000		$5 \cdot 10^{-16}$		3 670
$2 \cdot 10^{12}$	$6{,}3 \cdot 10^4$ m.	7 070		$1{,}3 \cdot 10^{-16}$		2 590
$4 \cdot 10^{12}$	$1{,}3 \cdot 10^5$ m.	5 000		$3{,}1 \cdot 10^{-17}$		1 830
$6 \cdot 10^{12}$	$1{,}9 \cdot 10^5$ m.	4 080		$1{,}4 \cdot 10^{-17}$		1 500
$8 \cdot 10^{12}$	$2{,}5 \cdot 10^5$ m.	3 540	3 800	$7{,}8 \cdot 10^{-18}$	$1{,}3 \cdot 10^{-17}$	1 300
$1 \cdot 10^{13}$	$3{,}2 \cdot 10^5$ m.	3 160	3 275	$5 \cdot 10^{-18}$	$8 \cdot 10^{-18}$	1 160
$1{,}1 \cdot 10^{13}$	$3{,}5 \cdot 10^5$ m.	3 015	3 073	$4{,}1 \cdot 10^{-18}$	$6{,}6 \cdot 10^{-18}$	1 110
$1{,}2 \cdot 10^{13}$	$3{,}8 \cdot 10^5$ m.	2 887	2 900	$3{,}5 \cdot 10^{-18}$	$5{,}6 \cdot 10^{-18}$	1 060
$1{,}3 \cdot 10^{13}$	$4{,}1 \cdot 10^5$ m.	2 774	2 749	$3{,}0 \cdot 10^{-18}$	$4{,}7 \cdot 10^{-18}$	1 010
$1{,}4 \cdot 10^{13}$	$4{,}4 \cdot 10^5$ m.	2 673	2 617	$2{,}6 \cdot 10^{-18}$	$4{,}1 \cdot 10^{-18}$	959
$1{,}6 \cdot 10^{13}$	$5{,}1 \cdot 10^5$ m.	2 500	2 394	$2{,}0 \cdot 10^{-18}$	$3{,}1 \cdot 10^{-18}$	878
$1{,}8 \cdot 10^{13}$	$5{,}7 \cdot 10^5$ m.	2 357	2 213	$1{,}5 \cdot 10^{-18}$	$2{,}5 \cdot 10^{-18}$	811
$2 \cdot 10^{13}$	$6{,}3 \cdot 10^5$ m.		2 063		$2 \cdot 10^{-18}$	756
$4 \cdot 10^{13}$	$1{,}3 \cdot 10^6$ m.		1 300		$5 \cdot 10^{-19}$	476
$1 \cdot 10^{14}$	$3{,}2 \cdot 10^6$ m.		706		$8 \cdot 10^{-20}$	259
$4 \cdot 10^{14}$	$1{,}3 \cdot 10^7$ m.		280		$5 \cdot 10^{-21}$	103
$6 \cdot 10^{14}$	$1{,}9 \cdot 10^7$ m.		214		$2{,}2 \cdot 10^{-21}$	78,3
$8 \cdot 10^{14}$	$2{,}5 \cdot 10^7$ m.		176		$1{,}3 \cdot 10^{-21}$	64,7
$1 \cdot 10^{15}$	$3{,}2 \cdot 10^7$ m.		152		$8 \cdot 10^{-22}$	55,7
$2 \cdot 10^{15}$	$6{,}3 \cdot 10^7$ m.		95,8		$2 \cdot 10^{-22}$	35,1
$4 \cdot 10^{15}$	$1{,}3 \cdot 10^8$ m.		60,3		$5 \cdot 10^{-23}$	22,1
$6 \cdot 10^{15}$	$1{,}9 \cdot 10^8$ m.		46,0		$2{,}2 \cdot 10^{-23}$	16,9
$8 \cdot 10^{15}$	$2{,}5 \cdot 10^8$ m.		38,0		$1{,}3 \cdot 10^{-23}$	13,9
$1 \cdot 10^{16}$	$3{,}2 \cdot 10^8$ m.		32,7		$8 \cdot 10^{-24}$	12,0
$2 \cdot 10^{16}$	$6{,}3 \cdot 10^8$ m.		20,6		$2 \cdot 10^{-24}$	7,56
$4 \cdot 10^{16}$	$1{,}27 \cdot 10^9$ m.		13,0		$5 \cdot 10^{-25}$	4,76
$6 \cdot 10^{16}$	$1{,}9 \cdot 10^9$ m.		9,92		$2{,}2 \cdot 10^{-25}$	3,64
$8 \cdot 10^{16}$	$2{,}54 \cdot 10^9$ m.		8,19		$1{,}3 \cdot 10^{-25}$	3,00
$1 \cdot 10^{17}$	$3{,}17 \cdot 10^9$ m.		7,06		$8 \cdot 10^{-26}$	2,586
$2 \cdot 10^{17}$	$6{,}34 \cdot 10^9$ m.		4,45		$2 \cdot 10^{-26}$	1,629
$4 \cdot 10^{17}$	$12{,}67 \cdot 10^9$ m.		2,800		$5 \cdot 10^{-27}$	1,026
$4{,}08 \cdot 10^{17}$	$12{,}93 \cdot 10^9$ m.		2,763		$4{,}8 \cdot 10^{-27}$	1,013
$4{,}16 \cdot 10^{17}$	$13{,}18 \cdot 10^9$ m.		2,728		$4{,}6 \cdot 10^{-27}$	1,000

Pradedant maždaug 10^{15}–10^{16}s, ši lentelė nusako vien tiktai reliktinių fotonų temperatūrą, nes barioninės medžiagos temperatūra ėmė darytis aukštesnė. Šio reiškinio priežastis – medžiagos susibūrimas į debesis ir žvaigždes, taip pat žvaigždžių gelmių traukimasis bei branduolinės reakcijos jose.

TURINYS

6

SKYRIUS

Algimantas Ažusienis

7

SKYRIUS

GALAKTIKA 386

Vytautas Straižys

8

SKYRIUS

GALAKTIKOS 420

Algimantas Ažusienis

9

SKYRIUS

MŪSŲ VISATOS RAIDA 512

Algimantas Ažusienis

UDK 52(075.8)
Až-12

Ažusienis, Algimantas

Až-12 Astronomija : [vadovėlis] / Algimantas Ažusienis, Aloyzas Pučinskas, Vytautas Straižys. – 2-asis papild. ir patais. leid. – Vilnius : Kultūra, 2003. – 608 p., [4] iliustr. lap. : iliustr.
Dalyk. r-klė: p. 588–599.

ISBN 9986-435-10-2

Vadovėlis skirtas aukštųjų mokyklų fizikos specialybės studentams, gimnazijų ir vidurinių mokyklų mokytojams. Juo gali naudotis ir astronomijos mėgėjai, vyresniųjų klasių moksleiviai.

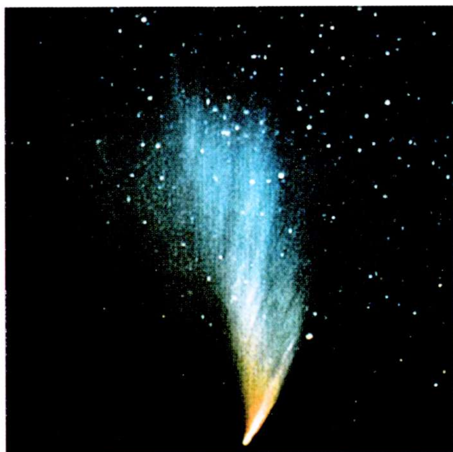
UDK 52(075.8)

Algimantas Ažusienis,
Aloyzas Pučinskas,
Vytautas Straižys

ASTRONOMIJA

Redaktorius *Antanas Staponkus*
Dailininkas *Alfonsas Žvilius*
Maketavo *Alė Zimanienė*

SL 020. Išleido "Kultūros" leidykla, Stiklių g. 8, 2001 Vilnius. Spausdino AB spaustuvė "Spindulys", Gedimino g. 10, 3000 Kaunas. www. SPINDULYS.lt

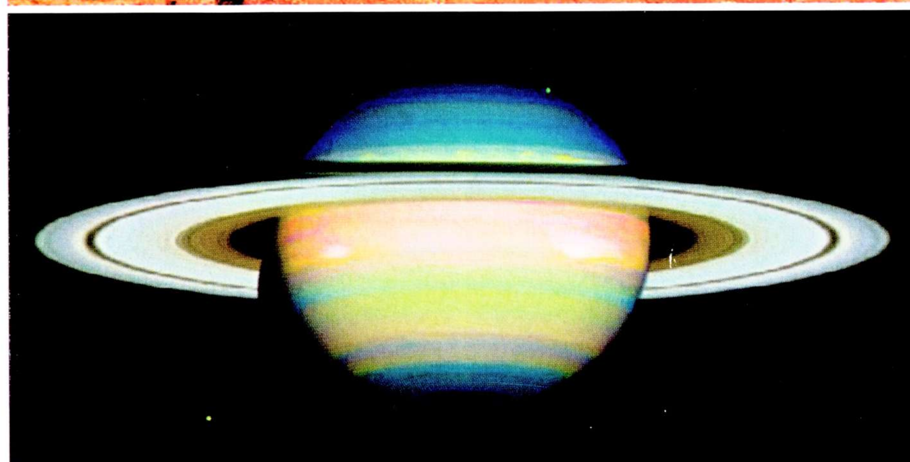




1S, 2S

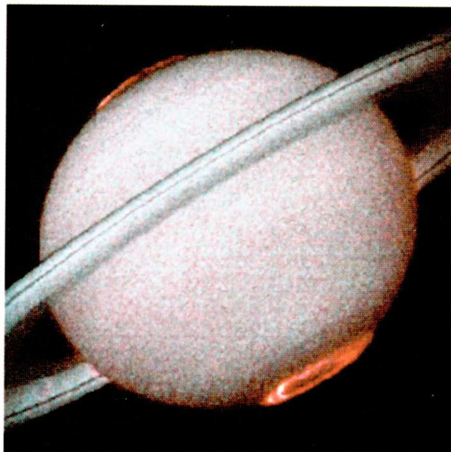
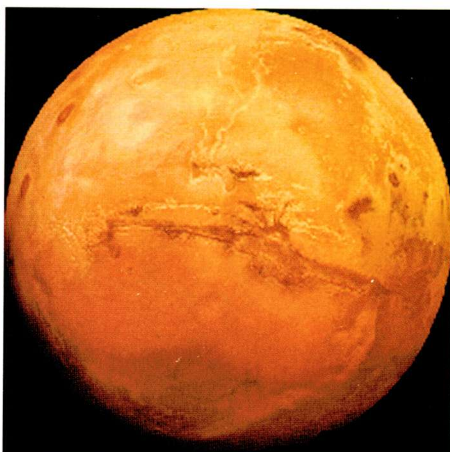


3S

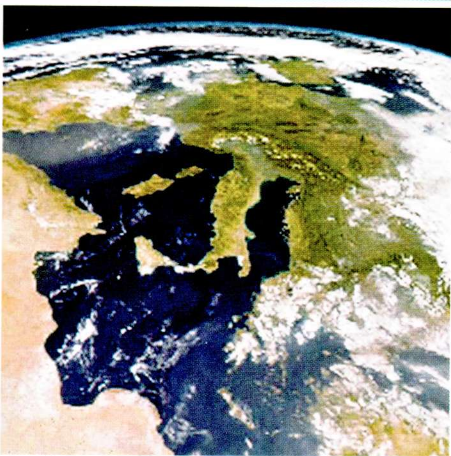


4S

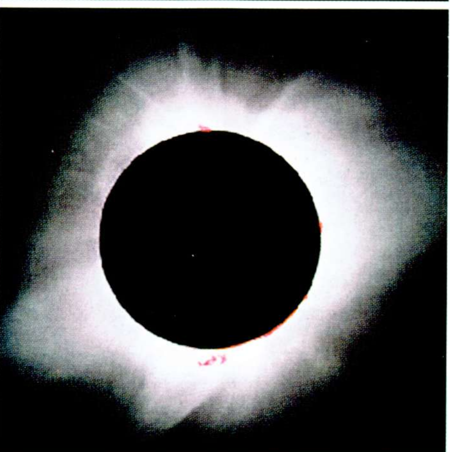
1S pav. *Vesto kometa 1976 m.* **2S** pav. *Heilo–Bopo kometa 1997 m.* **3S** pav. *Marso akmenys („Mars Pathfinder“).* **4S** pav. *Saturnas*

5S, 6S

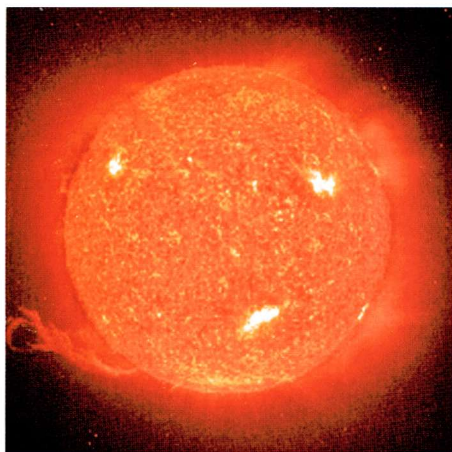


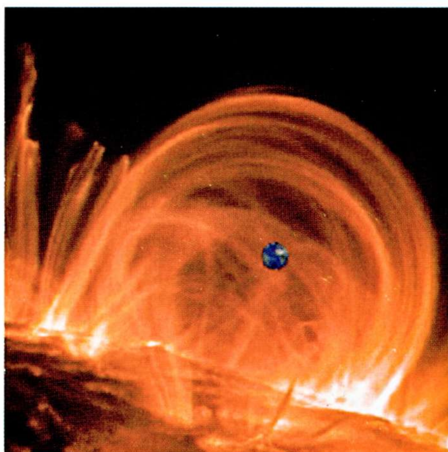

7S, 8S

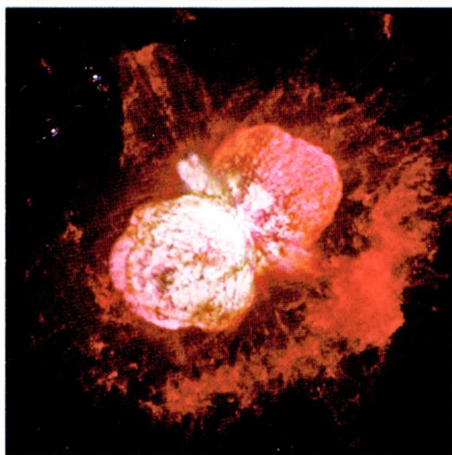
9S, 10S

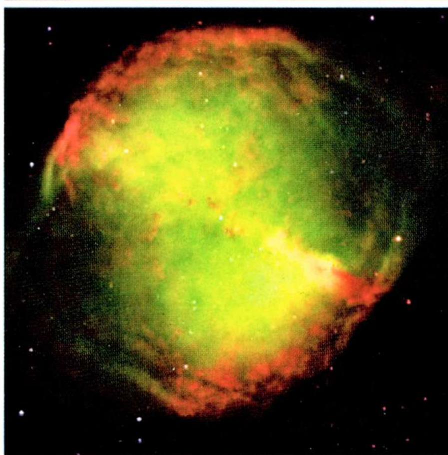
5S pav. *Saturno poliarinės pašvaistės.* **6S** pav. *Marso nuotraukų iš „Viking" montažas.* **7S** pav. *Žemė iš kosmoso.* **8S** pav. *Mėnulio užtemimas.* **9S** pav. *Jupiterio palydovas Ija („Galileo").* **10S** pav. *Saulės užtemimas*



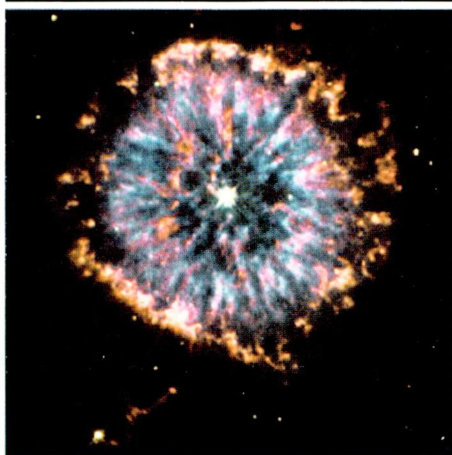


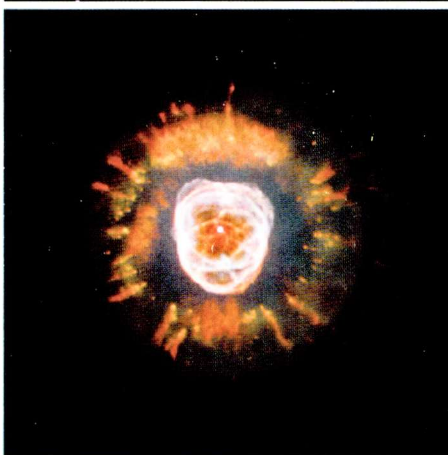
11S, 12S





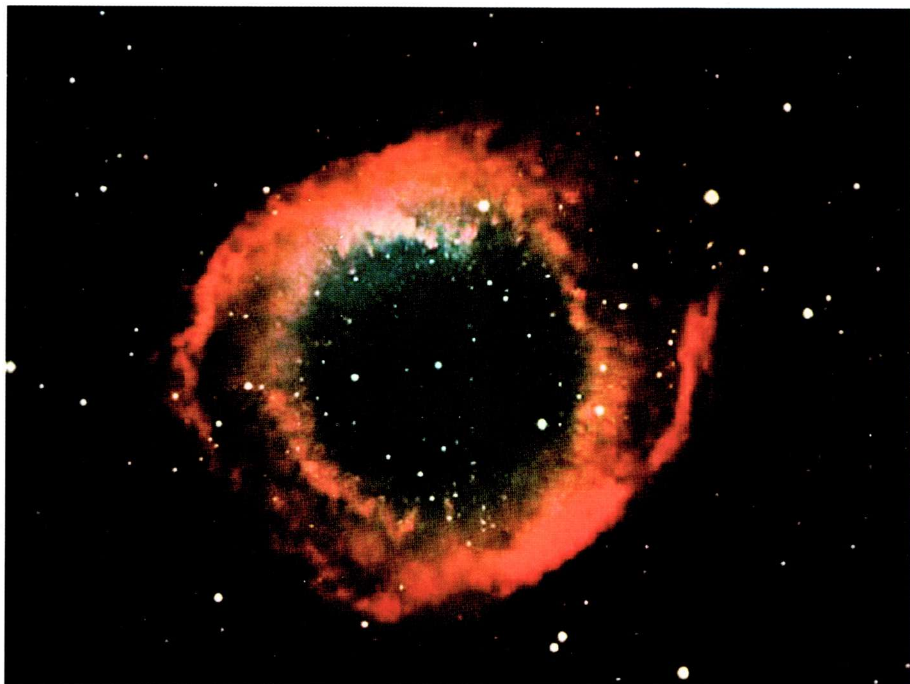
13S, 14S



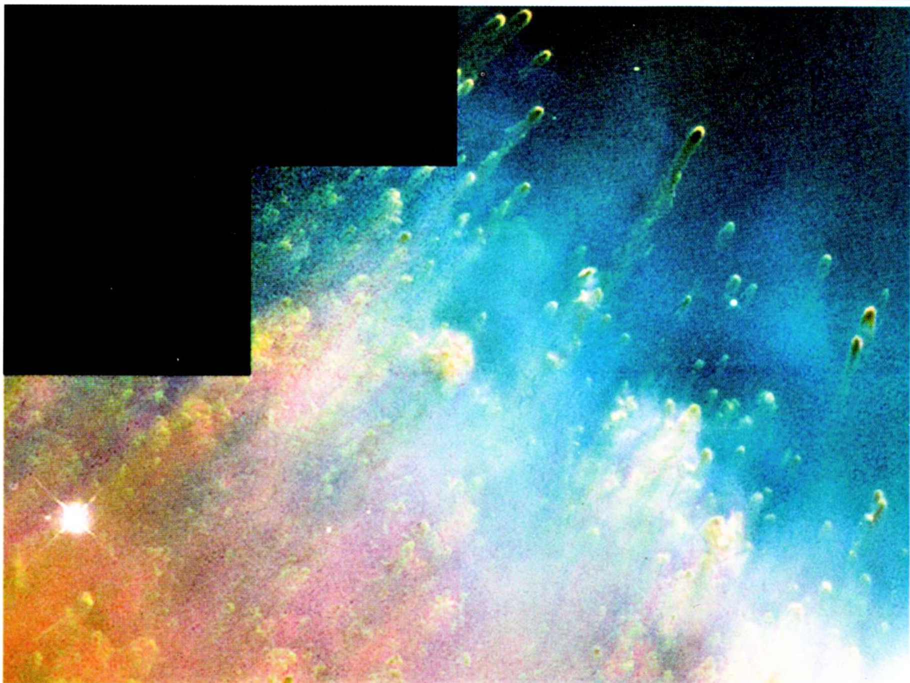


15S, 16S

11S pav. *Saulės vaizdas, gautas UV spinduliais (SOHO).* **12S** pav. *Saulės protuberantai (TRACE). Norint palyginti jų dydį, nupiešta mėlyna Žemė.* **13S** pav. *Sproginėjanti žvaigždė η Car (HST).* **14S** pav. *Planetiškasis ūkas Hantelis, arba M 27, arba NGC 6853 (ESO).* **15S** pav. *Planetiškasis ūkas Akies Rainelė, arba NGC 6751 (HST).* **16S** pav. *Planetiškasis ūkas Eskimas, arba NGC 2392 (HST)*

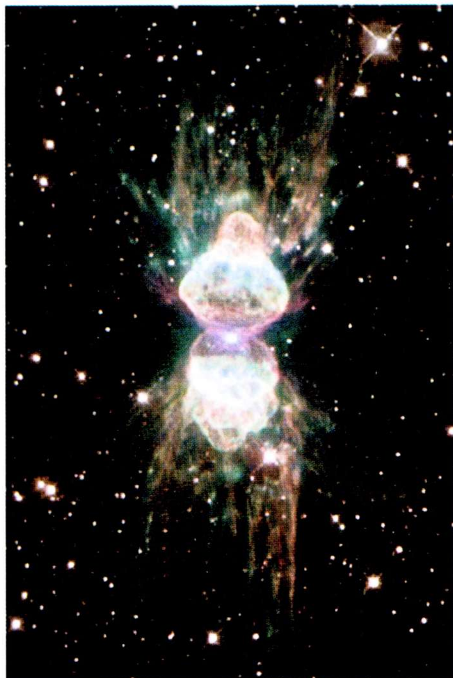


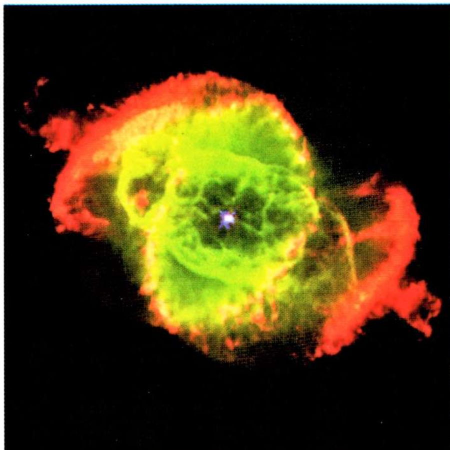
17S



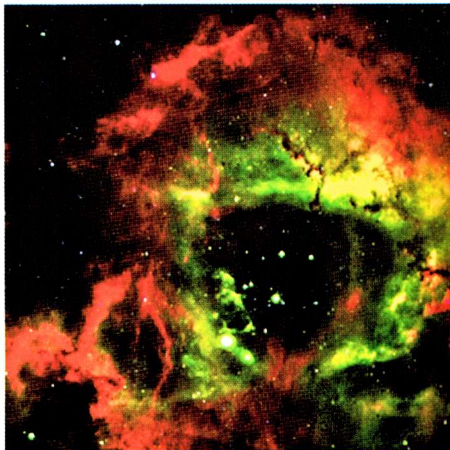
18S

17S pav. *Planetiškasis ūkas Sraigė, arba NGC 7293.* **18S** pav. *Sraigės dalis (HST)*

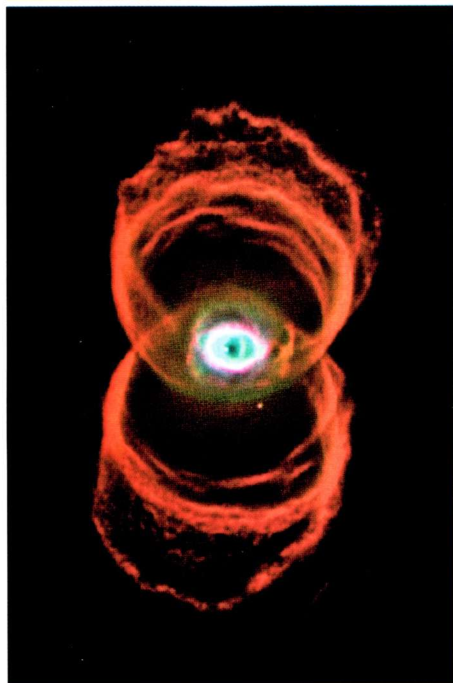


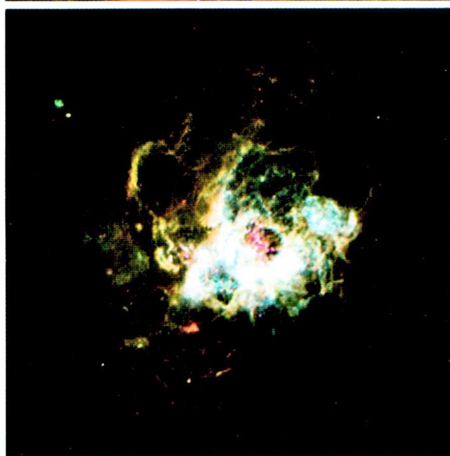


19S, 20S



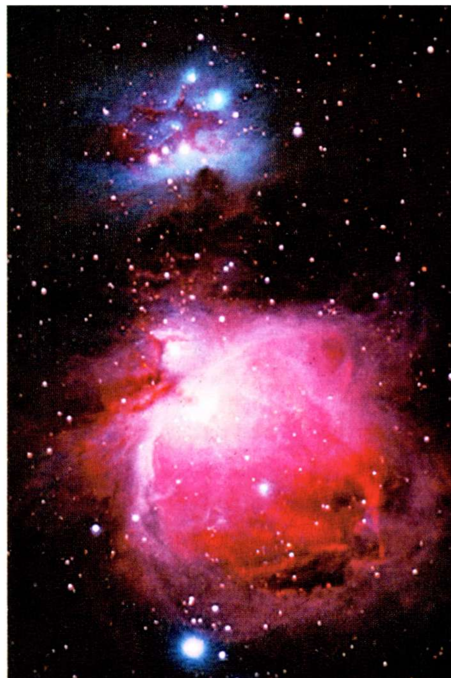
22S



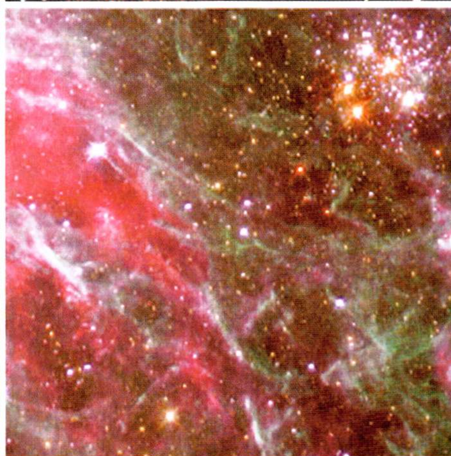


21S, 23S

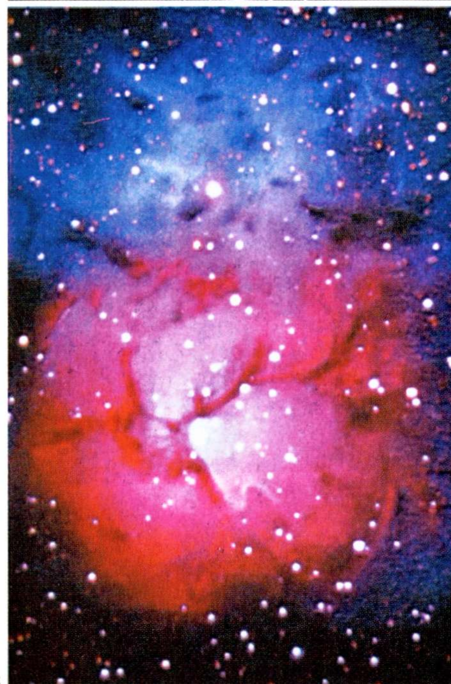
19S pav. *Planetiškasis ūkas Skruzdėlė, arba* M_{z3} **20S** pav. *Planetiškasis ūkas Katės Akis, arba NGC 6543.* **21S** pav. *Planetiškasis ūkas Smėlio Laikrodis (HST).* **22S** pav. *Emisinis ūkas Rozetė, arba NGC 2237-9. Jo viduje yra padrikasis žvaigždžių spiečius NGC 2244.* **23S** pav. *Emisinis ūkas NGC 604 Trikampio, arba M 33, arba NGC 598 galaktikoje*




24S, 25S



27S




26S, 28S

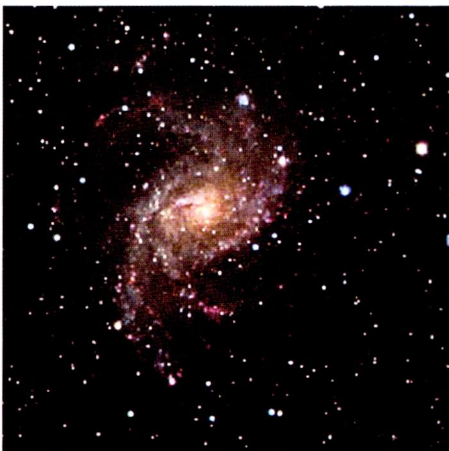
24S pav. *Didysis Oriono ūkas ir melsvi atspindžio ūkai* NGC 1973-5-7. **25S** pav. *Krabo ūkas, arba* M 1, *arba* NGC 1952 *(supernovos likučių ūkas).* **26S** pav. *Trilypis ūkas, arba* M 20, *arba* NGC 6514. **27S** pav. *Padrikasis žvaigždžių spiečius Hadge* 301 *ir supernovų likučių ūkas* (HST). *Tai maža Tarantulo ūko (žr.* ***6.5**, **8.14*** *ir* **37S** pav.) *dalis.* **28S** pav. *Padrikasis žvaigždžių spiečius Sietynas, arba* M 45




29S, 30S



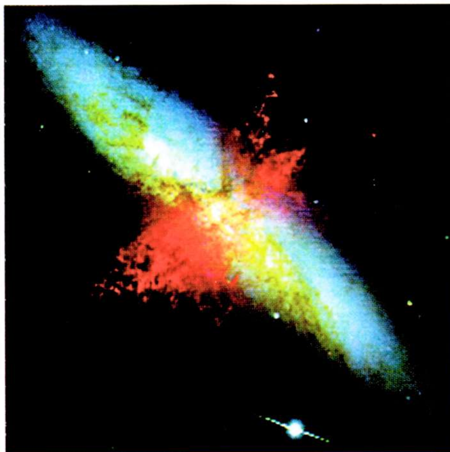

31S, 32S

33S, 34S

29S pav. *Dvigubas padrikasis žvaigždžių spiečius Persėjo h ir χ, arba NGC 869 ir 884.* **30S** pav. *Kamuolinis žvaigždžių spiečius M 80, arba NGC 6093.* **31S** pav. *Kamuolinio žvaigždžių spiečiaus 47 Tuc, arba NGC 104, centrinės dalies sektorius.* **32S** pav. *Spiralinės galaktikos M 51 centrinė dalis (dar žr.* **8.17** *pav.).* **33S** pav. *Spiralinė galaktika NGC 1232.* **34S** pav. *Spiralinė galaktika NGC 6946*





35S, 36S

37S

35S pav. *Žiedinė Seiferto galaktika* NGC 7742. **36S** pav. *Netaisyklingoji galaktika* M 82, *arba* NGC 3034. **37S** pav. *Didžiojo Magelano Debesies (Ir galaktika) maždaug 1/5 dalis. Baltas (dėl per didelio skaisčio) išsišakojęs plėmas raudonai švytinčiame* H II *laukų fone – gigantiškasis Tarantulo ūkas (dar žr.* **6.5**, **8.14** *ir* **27S** pav.*)*